

Modelování elektroenergetických sítí s využitím SW podpory

Modeling of electricity networks using SW support

Bc. Jiří Kunyt

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Petr Moldřík, Ph.D.

Ostrava, 2021

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá základními postupy modelování elektroenergetických sítí s využitím vzdělávací verze programu DAISY Bison Projektant. V teoretické části práce je popsán elektrický model sítě v souvislosti s použitým softwarem včetně matematického odvození Newton-Raphsonovy metody, kterou software využívá k řešení ustáleného chodu sítě. V teorii je také vysvětlena problematika poruchových stavů, zejména zkratových proudů a metoda jejich výpočtu. V praktické části práce je sestaven podrobný návod pro namodelování sítě dle zadaného mapového podkladu a dále vzorové řešení dílčích úkolů dle textového zadání. V přílohách jsou k dispozici další varianty mapových podkladů společně se základním řešením ustáleného chodu sítě. Praktická část je dále rozšířena o řešení ustáleného chodu sítě při napájení ze dvou stran a také o využití daného softwaru k řešení zkratových poměrů v elektrické síti.

Klíčová slova:

Modelování, DAISY Bison Projektant, Newton-Raphsonova metoda, ustálený chod sítě, zkratový proud

Abstract:

This diploma thesis deals with the basic procedures of power networks modeling with the use of educational version of the DAISY Bison Designer program. The theoretical part describes the electrical model of the network in relation to the used software, including the mathematical derivation of the Newton-Raphson method, which the software uses to solve the steady state of the network. The theory also explains the problem of fault conditions, especially short-circuit currents and the method of their calculation. In the practical part of the thesis, there is a detailed instruction for the network modeling, compiled according to a map material and a sample solution of partial tasks pursuant to the text assignment. In the supplements, there are other variants of the map materials along with the basic solution of the steady state of the network. The practical part is further extended by the solution of the steady state of the network while the network is powered from two sides. Furthermore, there is also to be found the use of the software to solve short-circuit conditions in the electrical network.

Key words:

Modeling, DAISY Bison Designer, Newton-Raphson method, steady state of network, short-circuit current

Poděkování:

Tímto chci poděkovat svému vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Petrovi Moldříkovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, dále společnosti DAISY spol. s.r.o. za technickou podporu a také mé rodině za podporu při vypracování této práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	- 5 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek	- 7 -
Úvod	- 9 -
1. Teoretický rozbor a metody výpočtů použitého SW	- 10 -
1.1. Elektrický model sítě	- 10 -
1.2. Výpočetní software DAISY Bizon Projektant	- 10 -
1.2.1. Typy uzlů v programu Bizon Projektant	- 10 -
1.2.2. Větvě	- 11 -
1.2.3. Injekce	- 13 -
1.3. Matematické odvození Newton-Raphsonovy metody	- 13 -
1.4. Aplikace iteračního postupu k řešení ustáleného chodu sítě	- 14 -
1.5. Základní teoretické poznatky k výpočtu zkratových poměrů v elektrické síti	- 16 -
1.5.1. Základní pojmy	- 16 -
1.5.2. Příčiny vzniku zkratů	- 18 -
1.5.3. Druhy zkratů	- 18 -
1.5.4. Výpočet zkratových proudů	- 20 -
1.5.5. Metoda souměrných složek	- 21 -
2. Praktické využití SW Bizon Projektant ve výuce	- 24 -
2.1. Popis použitého programu	- 24 -
2.2. Instalace a základní nastavení programu	- 24 -
2.3. Zadání semestrálního projektu do předmětu PEDS	- 25 -
2.4. Postup modelování dle zadaného mapového podkladu	- 28 -
2.5. Řešení dle zadání	- 38 -
2.6. Výpočet ustáleného chodu sítě při napájení ze dvou stran	- 52 -
2.6.1. Vypočtené hodnoty ustáleného chodu sítě při sepnutí daných spínačů	- 55 -
2.7. Využití SW podpory DBP k výpočtu zkratových poměrů v síti	- 57 -
2.7.1. Zadání projektu do předmětu PJES	- 57 -
2.7.1.1. Metodický postup	- 57 -
2.7.1.2. Zadávání zkratových příspěvků	- 57 -
2.7.1.3. Umístění zkratu	- 58 -
2.7.1.4. Výpočet zkratových poměrů	- 59 -
2.7.2. Výsledné hodnoty zkratových poměrů	- 61 -
2.8. Návrh jištění	- 62 -
Závěr	- 64 -
Literatura	- 65 -
Seznam příloh	- 66 -

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	význam [jednotka]
A	- Ampér
AlFe	- druh venkovního vedení: hliníkové lano s ocelovou duší
B	- susceptance [S]
B_m	- magnetizační susceptance [S]
C	- kapacita [F]
CAD	- Computer Aided Design (počítačem podporované projektování)
ČSN	- Česká státní norma
DAISY	- Dispečerské Automatizované Informační Systémy
E uzlu	- velikost napětí v daném uzlu [V]
EDU	- educational, (vzdělávací)
EN	- Evropská norma
ES	- elektrizační soustava
E -zadané	- konstantní vstupní napětí zdroje [V]
\hat{F}	- Fortescuova transformační matice
G	- svodová vodivost [S]
G_{Fe}	- náhradní vodivost respektující ztráty v železe [S]
GND	- ground, (uzemnění)
Hz	- Hertz
I	- proud [A]
\hat{I}	- vektor injektovaných komplexních proudů [A]
I_k''	- počáteční souměrný rázový zkratový proud [A]
I_{rel}	- relativní proud [%]
J	- Jacobiho matice
L	- indukčnost [H]
L1, L2, L3	- označení jednotlivých fází
MB	- megabyte
MWh	- megawatthodina
N_i	- investiční náklady [Kč]
NN	- nízké napětí
NP	- napájecí přípojnice
NPV	- net present value, (čistá současná hodnota)
Odb / O	- odběr
P	- činný výkon [W]
P_i	- injektovaný činný výkon v uzlu i [W]
P_{cz}	- celkové zatížení sítě [W]
PAS	- Power Application Software
PP	- pomocná přípojnice
PU	- pomocný uzel
Q	- jalový výkon [var]
Q_i	- injektovaný jalový výkon v uzlu i [var]
Q-min, Q-max	- meze pro dodávku jalového výkonu [var]
R	- rezistance [Ω]
S	- siemens

S	- zdánlivý výkon [VA]
SCADA	- Supervisory Control And Data Acquisition, (dispečerské řízení a sběr dat)
SK	- synchronní kompenzátor
S_k	- zkratový výkon [VA]
SP	- spínač
SW	- software
T_k	- časová konstanta [s]
U	- napětí [V]
\hat{U}	- vektor komplexních sdružených uzlových napětí [V]
$\hat{U}_1, \hat{U}_2, \hat{U}_0$	- sousledná, zpětná a netočivá složka napětí [V]
$\hat{U}_A, \hat{U}_B, \hat{U}_C$	- fázory napětí jednotlivých fází A, B, C [V]
U_i	- napětí v uzlu i [V]
U_k	- napětí v uzlu k [V]
U_s	- sdružené napětí [V]
V	- Volt
VA	- voltampér
Ved / V	- vedení
VN	- vysoké napětí
X	- reaktance [Ω]
X_σ	- rozptylová reaktance [Ω]
Y	- admitance [S]
\hat{Y}	- admitanční matice
Z	- impedance [Ω]
$\hat{Z}_1, \hat{Z}_2, \hat{Z}_0$	- sousledná, zpětná a netočivá impedance prvků ES [Ω]
c_{min}, c_{max}	- napěťový součinitel (minimální / maximální) [-]
e	- Eulerovo číslo
ed.	- edice
j	- imaginární jednotka
l	- délka [m]
spol. s.r.o.	- Společnost s ručením omezeným
u_k	- napětí nakrátko [%]
x_d'	- poměrná přechodná reaktance [%]
x_d''	- poměrná rázová reaktance [%]
α_{ik}	- fázové natočení daného prvku v admitanční matici [°]
ΔP	- činné ztráty [W]
ΔP_c	- činné ztráty celkové [W]
ΔP_T	- činné ztráty transformátoru [W]
ΔP_V	- ztráty na vedení [W]
ΔU	- rozdíl napětí [V]
$\Delta U_{\%}$	- procentní změna napětí [%]
φ_i	- fázový posun napětí v uzlu i [°]
ε	- zadaná přesnost výpočtu [-]
φ	- fázový posun [rad]
Ω	- Ohm
ω	- úhlová rychlost [Hz]

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Obr. 1.1: Jednofázový model vedení s jednotlivými parametry [3]	- 12 -
Obr. 1.2: Náhradní schéma T-článku dvouvinutového transformátoru [4]	- 12 -
Obr. 1.3: Obecný průběh zkratového proudu [6]	- 17 -
Obr. 1.4: Schéma trojfázového zkratu [8]	- 18 -
Obr. 1.5: Schéma trojfázového zemního zkratu [8]	- 18 -
Obr. 1.6: Schéma dvoufázového zkratu fází L2 a L3 [8]	- 19 -
Obr. 1.7: Schéma dvoufázového zemního zkratu fází L2 a L3 [8]	- 19 -
Obr. 1.8: Schéma jednofázového zkratu fáze L3 [8]	- 19 -
Obr. 1.9: Schéma simultánního zkratu fází L2 a L3 [8]	- 19 -
Obr. 1.10: Rozklad nesymetrických fázorů napětí na součet tří symetrických složek [10]	- 21 -
Obr. 2.1: Nastavení pomocné mřížky	- 25 -
Obr. 2.2: Mapový podklad 1	- 27 -
Obr. 2.3: Dialogové okno uzlu	- 28 -
Obr. 2.4: Dialog tvorby uzlu	- 29 -
Obr. 2.5: Dialogové okno transformátoru	- 29 -
Obr. 2.6: Dialogové okno k výběru transformátoru	- 30 -
Obr. 2.7: Namodelovaný transformátor	- 30 -
Obr. 2.8: Dialog objektu transformátoru s obecnými parametry	- 31 -
Obr. 2.9: Parametry odběrového uzlu	- 32 -
Obr. 2.10: Dialogové okno vedení	- 33 -
Obr. 2.11: Dialog k zadání délky a typu vedení	- 33 -
Obr. 2.12: Namodelované vedení mezi dvěma odběrovými uzly	- 34 -
Obr. 2.13: Dialogové okno generátoru	- 34 -
Obr. 2.14: Namodelovaný generátor	- 35 -
Obr. 2.15: Parametry generátoru	- 35 -
Obr. 2.16: Dialogové okno k uložení obrázku	- 36 -
Obr. 2.17: Namodelované schéma v programu DAISY Bizon projektant	- 37 -
Obr. 2.18: Dialogové okno umožňující změnu zapojení	- 38 -
Obr. 2.19: Grafické rozložení napětí v celé síti bez zdroje	- 41 -
Obr. 2.20: Grafické rozložení napětí po zvětšení průřezu u každého vedení o 1 stupeň dle normalizované řady	- 41 -
Obr. 2.21: Grafické rozložení napětí v celé síti se zdrojem	- 42 -
Obr. 2.22: Grafická závislost rozložení změny napětí na kmenovém vedení	- 42 -
Obr. 2.23: Grafická závislost změny napětí na vzdálenosti způsobená změnou jalového výkonu	- 44 -
Obr. 2.24: Sloupcový graf vyjadřující celkové ztráty v závislosti na změně jalového výkonu zdroje	- 45 -
Obr. 2.25: Sloupcový graf vyjadřující celkové ztráty v závislosti na změně činného výkonu zdroje	- 46 -
Obr. 2.26: Grafická závislost rozložení napětí v síti při odpojení úseku vedení Ved_1	- 47 -
Obr. 2.27: Grafická závislost rozložení napětí v síti při odpojení úseku Ved_10	- 48 -
Obr. 2.28: Graf zobrazující kumulovaný cash flow	- 50 -
Obr. 2.29: Schéma sítě při napájení ze dvou stran	- 53 -
Obr. 2.30: Namodelované schéma včetně výpočtu v základní konfiguraci	- 54 -

Obr. 2.31: Dialogové okno napájecího uzlu s kartou pro zadávání zkratových příspěvků	- 58 -
Obr. 2.32: Dialogové okno pro definici zkratů	- 59 -
Obr. 2.33: Schéma projektu	- 60 -
Obr. 2.34: Grafický průběh zkratového proudu podél vedení	- 61 -
Tab. 2.1: Vypočtené hodnoty napětí a dodávek, resp. odběrů výkonů pro fyzické uzly	- 38 -
Tab. 2.2: Vypočtené hodnoty ztrát a relativního proudu pro transformátor	- 39 -
Tab. 2.3: Vypočtené hodnoty ztrát a relativního proudu pro vedení	- 39 -
Tab. 2.4: Vypočtené hodnoty napětí pro určení limitního výkonu zdroje	- 40 -
Tab. 2.5: Vypočtené hodnoty napětí v uzlech dle zvoleného jalového výkonu	- 43 -
Tab. 2.6: Vypočtené rozdíly napětí	- 43 -
Tab. 2.7: Vypočtené hodnoty činných ztrát dle změny jalového výkonu	- 44 -
Tab. 2.8: Vypočtené hodnoty napětí v uzlech dle zvoleného činného výkonu	- 45 -
Tab. 2.9: Vypočtené hodnoty činných ztrát dle změny činného výkonu	- 46 -
Tab. 2.10: Vypočtené hodnoty velikostí napětí v uzlech sítě a procentního zatížení úseků vedení a transformátoru	- 47 -
Tab. 2.11: Investiční náklady pro transformovnu 110/22 kV	- 48 -
Tab. 2.12: Investiční náklady pro vedení 22 kV (ceny za 1 km trojžilového vedení)	- 49 -
Tab. 2.13: Předpokládané ekonomické údaje	- 50 -
Tab. 2.14: Výsledná tabulka ekonomické efektivity metodou NPV	- 51 -
Tab. 2.15: Vypočtené hodnoty napětí a dodávek činného a jalového výkonu pro fyzické uzly	- 55 -
Tab. 2.16: Vypočtené hodnoty ztrát a relativního proudu pro transformátory	- 55 -
Tab. 2.17: Vypočtené hodnoty ztrát a relativního proudu pro vedení	- 55 -
Tab. 2.18: Vypočtené celkové hodnoty ztrát	- 56 -
Tab. 2.19: Toky do zkratu na vedení (zkrat fáze R)	- 61 -
Tab. 2.20: Zkratová napětí včetně fázového natočení v místě poruchy postiženého vedení	- 61 -
Tab. 2.21: Toky do zkratu na vedení (zkrat fáze R)	- 62 -
Tab. 2.22: Zkratová napětí včetně fázového natočení v místě poruchy postiženého vedení	- 62 -
Tab. 2.23: Srovnání jednotlivých variant výpočtů zkratů a jejich hodnoty v daných fázích	- 62 -

Úvod

V dnešní době představuje elektrická energie jeden ze základních předpokladů pro fungování moderní lidské společnosti. Slouží k rozvoji techniky a vědy, využívá se ve všech odvětvích průmyslu a dopravy, je zkrátka nezbytná pro celkové hospodářství a ekonomiku státu. S demografickým růstem lidstva a zvyšováním životní úrovně bude její spotřeba neustále narůstat. Přesto i s rostoucí spotřebou elektrické energie a připojováním alternativních zdrojů do elektrizační soustavy (ES) musí být v soustavě zajištěna její spolehlivost, stabilita a především bezpečnost provozu související s jejím koordinovaným řízením. Hlavním úkolem ES je dodávka požadovaného množství elektrické energie odběratelům v určitém čase a kvalitě. Současný vědecký pokrok a soustavná technologická modernizace jednotlivých zařízení pro výrobu elektrické energie vede ke zvyšování efektivity výroby elektrické energie a také ke snížení negativních dopadů na životní prostředí.

Elektrizační soustavu lze chápat jako dynamický systém, v němž okamžité hodnoty stavových veličin závisí na okamžitých hodnotách řízení v daném okamžiku. Pokud v soustavě nedochází ke změnám stavových veličin, pak se jedná o rovnovážný stav charakterizující ustálený chod, v němž se základní provozní parametry nemění a jsou tedy konstantní. Pokud ovšem dochází ke změnám stavových veličin, resp. provozních parametrů soustavy v důsledku poruch, změn zatížení či manipulací v ES, pak se narušuje stabilita soustavy a soustava přechází z jednoho ustáleného provozního stavu do nového ustáleného provozního stavu, čili jedná se o přechodný děj.

Problematiky ustáleného chodu sítě a přechodných dějů probíhajících v elektrizačních soustavách lze efektivně řešit pomocí počítačů, jejichž hlavním nástrojem k sestavení elektrických sítí jsou nejrůznější počítačové programy, jež umožňují namodelovat zjednodušený reálný obraz elektrické sítě a následně provádět simulace různých provozních a poruchových stavů, které se mohou v síti vyskytnout. Výpočtem lze poté analyzovat chování sítě v různých konfiguracích a provozních režimech, výstupem výpočtů jsou zejména velikosti napěťových a proudových poměrů v síti, toky činných a jalových výkonů a velikosti ztrát jednotlivých prvků modelované sítě. Vypočtené hodnoty se také používají při řešení řady optimalizačních úloh, například hospodárné rozdělování výroby či optimální regulace napětí. Mezi důležité aspekty analýzy sítě patří také výpočty zkratových proudů především s ohledem na rozvoj a projektování sítě, kdy je nutné kontrolovat, zda charakteristické hodnoty zkratových proudů nepřekročí parametry daného zařízení. Tyto výpočty jsou také důležité pro zabezpečení sítě, tedy správné nastavení ochran a jistících prvků.

Tato práce využívá pro analýzu sítě vzdělávací verzi programu DAISY Bizon Projektant z produktové řady PAS DAISY Off-Line, který lze využít pro potřeby semestrálních projektů v předmětech Projektování elektrických distribučních sítí (PEDS 410-4114/01) a Přechodné jevy v elektrizačních soustavách (PJES 410-4115-01).

1. Teoretický rozbor a metody výpočtů použitého SW

1.1. Elektrický model sítě

Elektrický model sítě reprezentuje v předem stanovených měřítkách danou elektrizační soustavu a umožňuje na něm realizovat výpočty pro všechny zamýšlené změny konfigurace včetně poruchových stavů, představuje tedy velmi výhodný nástroj pro návrh, rozvoj a provoz soustavy. K výpočtu elektroenergetické sítě je nutná definice veškerých potřebných dat, především zadání parametrů jednotlivých prvků sítě a jejich topologické propojení. Hlavními úkoly výpočtů je stanovení velikostí napěťových a výkonových poměrů v uzlech sítě, zjišťování, zda není nějaká větev přetížena, dále stanovení hospodárnosti provozu, tedy určení velikostí ztrát, důležitá je také analýza poruchových stavů, zejména výpočet zkratových poměrů v různých uzlech sítě pro správné dimenzování elektrických ochran. [1]

Model se skládá z uzlů a větví. Elektrický model je popsán v souvislosti s použitým programem v praktické části práce.

1.2. Výpočetní software DAISY Bizon Projektant

Soubor programů PAS-DAISY Off-Line se využívá k analýze režimů elektroenergetických sítí včetně jejich návrhů, modelování, projektování, simulace a hodnocení provozu. Tvůrcem softwarů je firma DAISY spol. s r.o., která se specializuje na aplikaci moderních výpočetních metod a automatizované systémy dispečerského řízení v energetice. Její služby využívají přední distribuční energetické a přenosové společnosti včetně firem z oboru elektroprojekce.

Výpočetní systém Bizon Projektant slouží k modelování, simulaci, projektování, plánování rozvoje a provozu elektroenergetických sítí všech napěťových hladin. Součástí programu je také podpora pro výpočty nastavení elektrických ochran včetně jištění pojistkami a jističi. Návrh systému byl veden s důrazem na jednoduchou modifikaci výpočetních dat a komplexnost využívaných výpočetních metod. Výhodou produktu je možnost spolupráce s CAD systémy či napojení na reálná data ze systému SCADA, jež se využívá při dispečerském řízení elektrizačních soustav. [11]

V rámci diplomové práce se využívá vzdělávací verze programu Bizon Projektant s určitými omezeními, jež jsou popsány v praktické části práce. Stejnou verzi (k roku 2020) budou využívat i studenti v rámci svých cvičení v daných předmětech. V případě potřeby je na katedře elektroenergetiky dostupná i plná verze programu.

1.2.1. Typy uzlů v programu Bizon Projektant

Základním objektem elektrické sítě je uzel, samostatně pracující úsek sběrnice, kde lze do sítě dodávat či odebírat výkon. Uzly jsou vzájemně propojeny pomocí větví vedení. Za uzel se považuje i místo, kde se vedení větví (T-článek), případně místo, kde přechází na jiný typ vedení nebo průřez. Mezi základní typy uzlů patří uzel odběrový, napájecí a vztažný. [2]

Odběrový uzel reprezentuje uzel se zátěží, většinou obsahuje odběry činného a jalového výkonu, proto se často označuje jako PQ uzel, dopočítává se v něm velikost napětí a fázové natočení. Během výpočtu se v něm neudrhuje konstantní napětí, napětí je závislé na daném stavu sítě. Odběrové uzly, které slouží k definici a grafické prezentaci distribučních trafostanic se označují jako *meziodběry*. Uzly, které zpravidla nemají žádný odběr, se označují jako pomocné a slouží především k propojení větví mezi sebou.

Napájecí uzel může obsahovat kromě odběru i zdroj výkonu. V napájecím uzlu je udržován konstantní modul napětí, pokud se požaduje regulace na konstantní napětí (E-zadané) a je dostatečná dodávka jalového výkonu, která se pohybuje v mezích Q-min a Q-max dle provozních charakteristik zdroje. Pokud ovšem v napájecím uzlu není požadavek na konstantní napětí, nebo není dostatečná dodávka jalového výkonu, tak se uzel chová jako odběrový, což je kontrolováno při výpočtu potřebné velikosti dodávky jalového výkonu v uzlu.

Vztažný uzel představuje napájecí uzel zvolený jako referenční pro celý výpočet, přičemž v každé řešené soustavě je zvolen právě jeden, program takový uzel vybírá automaticky. Pokud je v soustavě více napájecích uzlů, pak program vybírá uzel s nejvyšším jmenovitým napětím, či s nejvyšší možnou regulací jalového výkonu. V tomto uzlu se dopočítávají bilance činných a jalových výkonů. Pro výpočty sítí 22 kV se za vztažný uzel považuje primární přípojnice napájecího transformátoru 110/22 kV. [2]

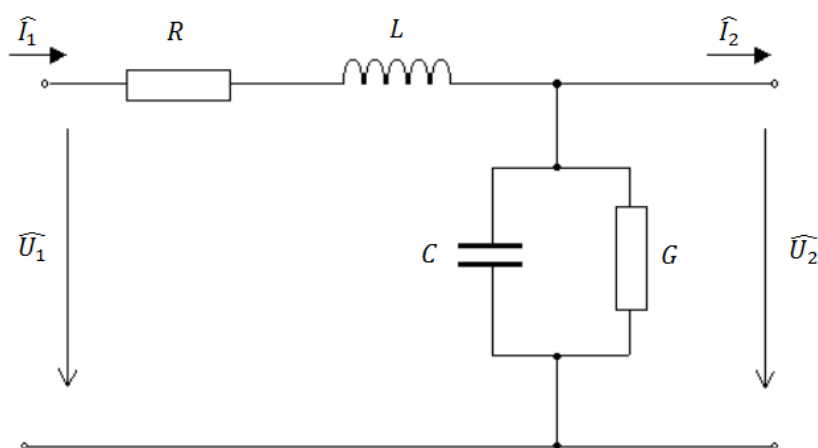
1.2.2. Větev

Větev zajišťuje elektrické propojení mezi dvěma sousedními uzly např. pomocí vedení, kabelů, transformátorů, případně propojuje uzel se zemí např. u injekcí generátorů, motorů či kompenzátorů. V místě, kde se uzel napojuje na větev, se označuje jako vývod a lze zde větev elektricky připojit či odpojit. Každé větví přísluší tolik vývodů, na kolik uzlů je napojena. Součástí větví jsou i jističí a spínací prvky. [2]

Vedení propojující dva uzly může být modelováno jako venkovní nebo kabelové. Základní parametry vedení, které se respektují při výpočtech, jsou podélná impedance \hat{Z} tvořená součtem činného odporu R a induktivní reaktance X a příčná admitance \hat{Y} tvořená součtem svodové vodivosti G a kapacitní susceptance B , přičemž svodová vodivost se respektuje až od hladiny napětí 400 kV. Jednotlivé parametry včetně vstupních a výstupních fázorů napětí a proudů jsou zobrazeny na obr. 1.1. V programu Bizon Projektant jsou jednotlivé parametry uloženy již v typových tabulkách pro daný typ vedení.

$$\hat{Z} = R + j\omega L = R + jX \quad [\Omega] \quad (1.1)$$

$$\hat{Y} = G + j\omega C = G + jB \quad [S] \quad (1.2)$$



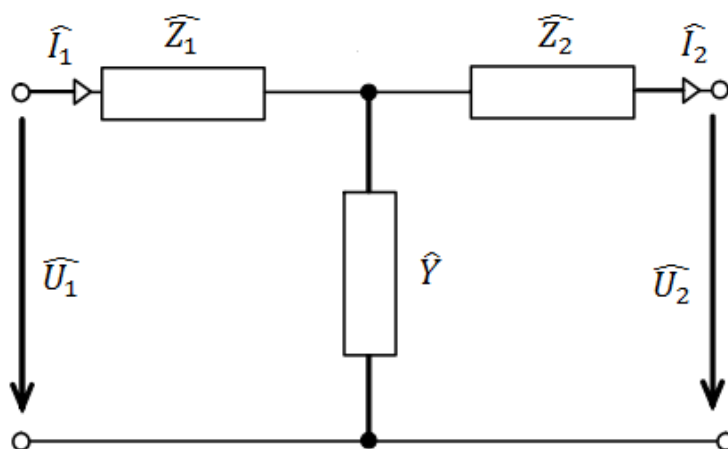
Obr. 1.1: Jednofázový model vedení s jednotlivými parametry [3]

Dvouvinuťový transformátor představuje větev, která propojuje dva uzly o různých napěťových hladinách. Náhradní schéma se modeluje nejčastěji pomocí T-článku (obr. 2) tvořeného podélnou impedancí \widehat{Z}_1 danou součtem činného odporu R_1 a rozptylovou reaktancí $X_{\sigma 1}$ vstupního vinutí a impedancí \widehat{Z}_2 danou součtem činného odporu R_2 a rozptylovou reaktancí $X_{\sigma 2}$ výstupního vinutí, dále je tvořen příčnou admitancí \widehat{Y} , která respektuje jednak činné ztráty fiktivního odporu magnetického obvodu vyjádřeného pomocí vodivosti G_{Fe} , a jednak magnetizační susceptancí B_m . Celková velikost podélné impedance \widehat{Z} se vypočítá z naměřených hodnot nakrátko a velikost příčné admitance \widehat{Y} z naměřených hodnot při stavu naprázdno. Program Bizon Projektant obsahuje ve svých typových tabulkách několik transformátorů s potřebnými parametry. Pro výpočty s regulačními transformátory je důležité znát umístění regulace (primární / sekundární vinutí) a její rozsah. Trojvinuťový transformátor vzájemně propojuje tři uzly, které mohou být na různých napěťových hladinách. Náhradní schéma je tvořeno třemi podélnými impedancemi a jednou příčnou admitancí. [4]

$$\widehat{Z}_1 = R_1 + jX_{\sigma 1} \quad [\Omega] \quad (1.3)$$

$$\widehat{Z}_2 = R_2 + jX_{\sigma 2} \quad [\Omega] \quad (1.4)$$

$$\widehat{Y} = G_{Fe} - jB_m \quad [S] \quad (1.5)$$



Obr. 1.2: Náhradní schéma T-článku dvouvinuťového transformátoru [4]

1.2.3. Injekce

Injekce představuje větev zapojenou mezi uzem a zem a odpovídá buď odběru (motor), nebo dodávce (generátor, pole generátorů – větrné farmy, fotovoltaická elektrárna, či kompenzátor) určité velikosti činného a jalového výkonu. Motor se chová jako zdroj výkonu v případě zkratu v síti a přispívá k nárůstu zkratového proudu. [2]

1.3. Matematické odvození Newton-Raphsonovy metody

Teorie kapitol 1.3. a 1.4., včetně jednotlivých rovnic vychází z těchto zdrojů: [1], [2], [3], [5].

Výpočet ustáleného chodu sítě je založen na modifikované variantě Newton-Raphsonovy metody, čímž je zajištěna rychlá a spolehlivá konvergence výpočtu. V metodě se nevyužívá sestavení a převod Jacobiánu do horního stupňovitého tvaru při Gaussově eliminaci v každé iteraci, nýbrž jen na začátku výpočtu a případně v některé další zvolené iteraci. Výpočet poté obvykle končí za 3 – 6 iterací.

Řeší se soustava nelineárních rovnic:

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (1.6)$$

K řešení této soustavy nelineárních rovnic se musí provést odhad kořenů v nulté iteraci: $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$, tyto odhady kořenů se od skutečných hodnot liší o difference: $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$, přesná hodnota je tedy dána součtem odhadu v nulté iteraci a příslušné difference. Soustavu lze tedy přepsat do následujícího tvaru:

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (1.7)$$

Každou rovnici ze soustavy rovnic (1.7) lze aproximovat pomocí Taylorova rozvoje funkce více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$. Pro první rovnici ze soustavy (1.7) platí:

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(0)}} \Delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^{(0)}} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_n^{(0)}} \Delta x_n + \emptyset_1 = y_1 \quad (1.8)$$

Funkce \emptyset_1 zahrnuje členy s vyššími mocninami jednotlivých diferencí $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$, včetně parciálních derivací vyšších řádů a faktoriálů. Pro odhady kořenů, které jsou blízké skutečným hodnotám, lze funkci \emptyset_1 zanedbat vzhledem k minimálním hodnotám jednotlivých diferencí se funkce \emptyset_1 limitně blíží k nule.

Maticově lze celou soustavu obecně přepsat do následující podoby, v níž parametr p určuje pořadí dané iterace. Zcela vlevo je tzv. rozdílový vektor, který ukazuje přesnost nalezených výsledků, matice parciálních derivací se nazývá Jacobiho matice a vektor neznámých diferencí Δx se nazývá přírůstkový, jelikož obsahuje meziiterační přírůstky stavových proměnných x_1, x_2, \dots, x_n .

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \\ y_2 - f_2(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \\ \vdots \\ y_n - f_n(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_1^{(p)}} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{x_2=x_2^{(p)}} & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_{x_n=x_n^{(p)}} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_1^{(p)}} & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{x_2=x_2^{(p)}} & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_{x_n=x_n^{(p)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_1^{(p)}} & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_{x_2=x_2^{(p)}} & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_{x_n=x_n^{(p)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(p+1)} \\ \Delta x_2^{(p+1)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(p+1)} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Tuto matici (1.9) lze ekvivalentně zapsat do tvaru:

$$[\Delta y^{(p)}] = [J^{(p)}] \cdot [\Delta x^{(p+1)}] \quad (1.10)$$

$$[\Delta x^{(p+1)}] = [J^{(p)}]^{-1} \cdot [\Delta y^{(p)}] \quad (1.11)$$

Pomocí maticové inverze Jacobiánu a jeho násobením rozdílovým vektorem se vypočte přírůstkový vektor a určí se nové, opravené odhady kořenů:

$$x_i^{(p+1)} = x_i^{(p)} + \Delta x_i^{(p+1)} \quad (1.12)$$

Celý tento proces se opakuje až do okamžiku, kdy je splněno konvergenční kritérium:

$$\max_i |y_i - f_i(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})| \leq \varepsilon \quad (1.13)$$

Čili v momentě, kdy absolutní hodnota rozdílového vektoru bude menší nebo rovna zadané přesnosti ε , případně v momentě, kdy je dosaženo maximálního počtu iterací.

1.4. Aplikace iteračního postupu k řešení ustáleného chodu sítě

Každý uzel sítě je jednoznačně určen tzv. aktivními veličinami, uzel i je popsán buď fázory injektovaného proudu \hat{I}_i a sruženého uzlového napětí \hat{U}_i nebo velikostí sruženého napětí U_i , fází φ_i , činným P_i a jalovým Q_i injektovaným výkonem. Pro popis jejich vzájemných vazeb se vychází z definice komplexního výkonu (1.14) a z definice uzlové admitanční matice (1.16), která popisuje konfiguraci řešené sítě včetně jejích pasivních prvků. Prvky admitanční matice lze sestavit dle 2. Kirchhoffova zákona, pro prvky na hlavní diagonále Y_{ii} platí, že velikost daného prvku je rovna součtu admitancí všech větví, které do i -tého uzlu vstupují a pro prvky mimo hlavní diagonálu Y_{ik} platí, že jejich velikost je rovna zápornému součtu admitancí všech větví spojujících i -tý a k -tý uzel. V rovnici (1.16) představuje veličina $\hat{\mathbf{I}}$ sloupcový vektor injektovaných komplexních proudů, $\hat{\mathbf{Y}}$ čtvercovou uzlovou admitanční maticí a $\hat{\mathbf{U}}$ sloupcový vektor komplexních sružených uzlových napětí.

$$\hat{S}_i = \sqrt{3} \cdot \hat{U}_i \cdot \hat{I}_i^* = P_i + jQ_i \quad (1.14)$$

$$\hat{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\sqrt{3} \cdot \hat{U}_i^*} \quad (1.15)$$

$$\sqrt{3} \cdot \hat{I} = \hat{Y} \cdot \hat{U} \quad (1.16)$$

Úpravou rovnic (1.15) a (1.16) se získá následující vztah:

$$P_i - jQ_i = \sqrt{3} \cdot \hat{U}_i^* \cdot \hat{I}_i = \hat{U}_i^* \cdot \left(\sum_{k=1}^n \hat{Y}_{ik} \cdot \hat{U}_k \right) \quad (1.17)$$

Využívá se převodu admitanční matice do polárních souřadnic (1.18) a následně se provede úprava rovnice (1.17) na rovnici (1.19).

$$G_{ik} + jB_{ik} = Y_{ik} \cdot e^{j\alpha_{ik}}, \text{ kde } Y_{ik} = \sqrt{G_{ik}^2 + B_{ik}^2}, \alpha_{ik} = \arctg \frac{B_{ik}}{G_{ik}} \quad (1.18)$$

$$\begin{aligned} P_i - jQ_i &= \sqrt{3} \cdot \hat{U}_i^* \cdot \hat{I}_i = \hat{U}_i^* \cdot \left(\sum_{k=1}^n \hat{Y}_{ik} \cdot \hat{U}_k \right) = U_i \cdot e^{j(-\varphi_i)} \cdot \sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot e^{j\alpha_{ik}} \cdot U_k \cdot e^{j\varphi_k} \\ &= U_i \cdot \sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot U_k \cdot [\cos(\varphi_k - \varphi_i + \alpha_{ik}) + j\sin(\varphi_k - \varphi_i + \alpha_{ik})] \end{aligned} \quad (1.19)$$

Kosinus je sudá funkce a pro její argument platí: $\cos(-x) = \cos(x)$, sinus je funkce lichá a pro její argument platí: $\sin(-x) = -\sin(x)$. Těchto vlastností lze využít k poslední úpravě a následnému porovnání reálných a imaginárních částí z původní rovnice (1.17).

$$\begin{aligned} P_i &= U_i \cdot \sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot U_k \cdot \cos(\varphi_i - \varphi_k - \alpha_{ik}) \\ Q_i &= U_i \cdot \sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot U_k \cdot \sin(\varphi_i - \varphi_k - \alpha_{ik}) \end{aligned} \quad (1.20)$$

Posledním krokem je vyjádření rozdílových rovnic ΔP_i a ΔQ_i , které určují vzdálenost vypočtených stavových hodnot v dané iteraci od konečného řešení:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_i - U_i \cdot \sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot U_k \cdot \cos(\varphi_i - \varphi_k - \alpha_{ik}) \\ \Delta Q_i &= Q_i - U_i \cdot \sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot U_k \cdot \sin(\varphi_i - \varphi_k - \alpha_{ik}) \end{aligned} \quad (1.21)$$

Iterační výpočet diferencí $\Delta\varphi$ a ΔU , vystihuje následující maticový zápis, úkolem je tedy výpočet velikosti uzlového napětí včetně fázového natočení. Jacobiho matice je složena ze čtyř submatic H, N, J, L, které jsou definovány příslušnou parciální derivací (1.23).

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(p)} \\ \Delta Q^{(p)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(p)} & N^{(p)} \\ J^{(p)} & L^{(p)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varphi^{(p+1)} \\ \Delta U^{(p+1)} \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

$$H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \varphi_k}; \quad N_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial U_k}; \quad J_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial \varphi_k}; \quad L_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_k} \quad (1.23)$$

Je nutné poznamenat, že takto sestavená soustava rovnic je singulární, tedy její řádky jsou lineárně závislé, proto se volí jeden uzel za vztažný, přičemž se předpokládá, že tento uzel je napojen na nadřazenou síť, která se chová jako dokonale tvrdý zdroj a takový uzel má tedy zadáno konstantní napětí, příslušná rovnice se eliminuje z výpočtu.

Po vyřešení soustavy rovnic (1.22) v dané iteraci se získají nové, opravené hodnoty velikostí napětí včetně fázového natočení, tyto hodnoty se poté využijí k aktualizaci stavových proměnných dle následujících rovnic:

$$\begin{aligned} \varphi_i^{(p+1)} &= \varphi_i^{(p)} + \Delta\varphi_i^{(p+1)} \\ U_i^{(p+1)} &= U_i^{(p)} + \Delta U_i^{(p+1)} \end{aligned} \quad (1.24)$$

Cyklický výpočet skončí v momentě, kdy je splněno konvergenční kritérium dle nerovnice (1.25) a jejím porovnáním se zadanou přesností ε , čili rozdílů zadaných výkonů a výkonů vypočtených z napětí v uzlech, případně při dosažení maximálního počtu iterací.

$$\max_i \left| \frac{\Delta P}{\Delta Q} \right| \leq \varepsilon \quad (1.25)$$

Mezi výhody Newton-Raphsonovy metody patří: rychlá konvergence výpočtu, počet iterací nezávisí na velikosti sítě a nízké časové nároky. Mezi nevýhody patří: složitý matematický model, silná závislost na počátečním odhadu – možnost divergence a vyšší nároky na paměť počítače.

1.5. Základní teoretické poznatky k výpočtu zkratových poměrů v elektrické síti

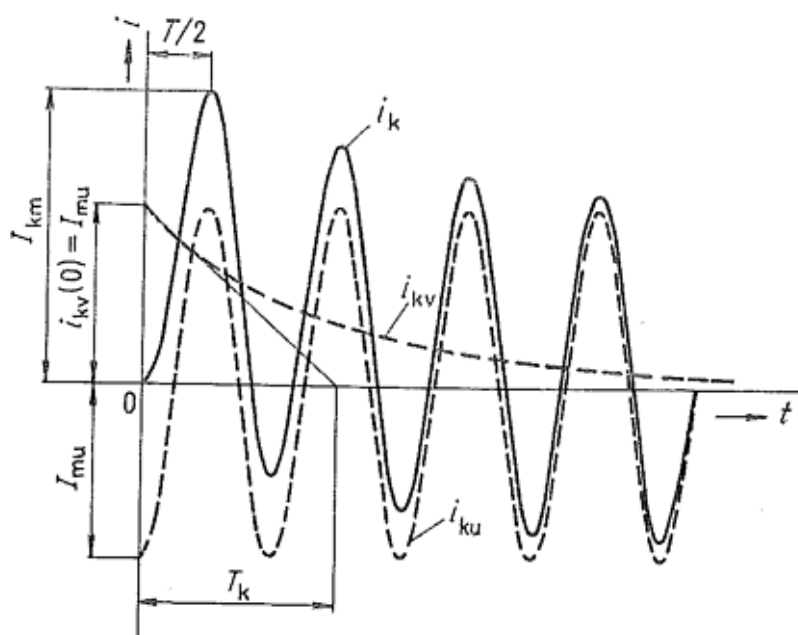
1.5.1. Základní pojmy

- Zkrat – nežádoucí spojení nakrátko mezi fázemi, popřípadě spojení jedné fáze se zemí v síti s přímo uzemněným uzlem. Při vzniku zkratu v elektrizační soustavě se mnohdy několikanásobně zmenšuje impedance obvodu mezi místem zkratu a napětovými zdroji, což vede k vzrůstu velikosti proudů ve větvích a poklesu napětí v uzlech elektricky blízkých místu zkratu. Nebezpečné jsou především účinky zkratu, a to tepelné a silové, mohou také vést k narušení stability paralelního chodu alternátorů a tím ohrozit provoz celé elektrizační soustavy, a proto se musí zkraty co nejrychleji vypnout pomocí příslušného elektrického přístroje. [6]
- Zemní spojení – spojení jedné fáze se zemí v síti s izolovaným uzlem, případně v sítích, jejichž uzel je uzemněn přes odpor nebo proměnlivou tlumivku. [7]
- Zkratový proud – nadproud v důsledku zkratu. [7]
- Předpokládaný zkratový proud – proud, který by protékal obvodem, pokud by byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení. [7]

- Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' – efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu. [7]
- Stejnoseměrná (aperiodická, volná) složka zkratového proudu i_{kv} – střední hodnota horní a dolní obálové křivky průběhu zkratového proudu exponenciálně klesající ze své původní hodnoty k nule dle časové konstanty T_k . [7]
- Nárazový zkratový proud i_p – maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu. [7]
- Ustálený zkratový proud I_{ku} – efektivní hodnota zkratového proudu po odeznění přechodného jevu. [7]
- Ekvivaletní oteplovací proud I_{th} – efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění. [7]
- Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k – fiktivní hodnota definována jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' a výpočtového sdruženého napětí U_s v daném místě před vznikem zkratu. Obvykle charakterizuje zkratovou odolnost rozvodných zařízení. [6]

$$S_k = \sqrt{3} \cdot I_k'' \cdot U_s \quad (1.26)$$

Každý zkratový proud představuje přechod z normálního provozního stavu do poruchového, tedy přechod z normálního pracovního proudu na zkratový proud, přičemž daný přechodný děj není skokový, ale trvá určitou dobu. Na následujícím obrázku je zobrazen obecný průběh zkratového nesouměrného proudu, kde I_{km} představuje nárazový zkratový proud, I_{mu} amplitudu ustálené složky zkratového proudu, T_k časovou konstantu, i_k časový průběh zkratového proudu, i_{ku} a i_{kv} ustálenou a volnou (stejnoseměrnou) složku zkratového proudu. [6]



Obr. 1.3: Obecný průběh zkratového proudu [6]

1.5.2. Příčiny vzniku zkratů

Různé vady elektrického zařízení – především izolace, kdy při výrobních postupech může dojít k různým nedokonalostem izolačního materiálu, zhoršená kvalita izolace může být způsobena i dlouhodobým přetěžováním vedení, kdy dochází k zrychlenému stárnutí izolace vlivem nadproudů.

Přepětí, ať už atmosférické či provozní může vést k narušení izolace a k následnému zkratu.

Velmi častá příčina je cizí zásah (lidé, přírodní vlivy) např. při překopnutí kabelu při zemních pracích, sesuvy půdy, pády stromů.

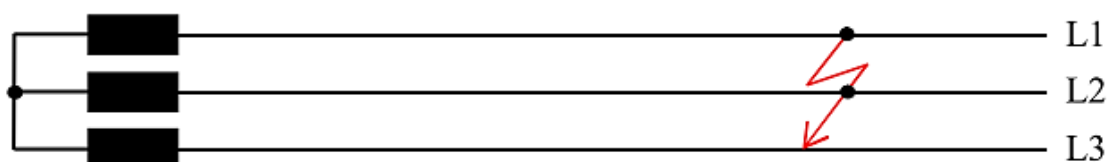
Nedostatečná zkratová odolnost zařízení vyskytující se u starších nerekonstruovaných zařízení v soustavách s prudkým nárůstem hodnot zkratových proudů.

Vlivem selhání lidského činitele – chybné manipulace v elektrických zařízeních, zvláště v rozvodech vysokého a velmi vysokého napětí. [10]

1.5.3. Druhy zkratů

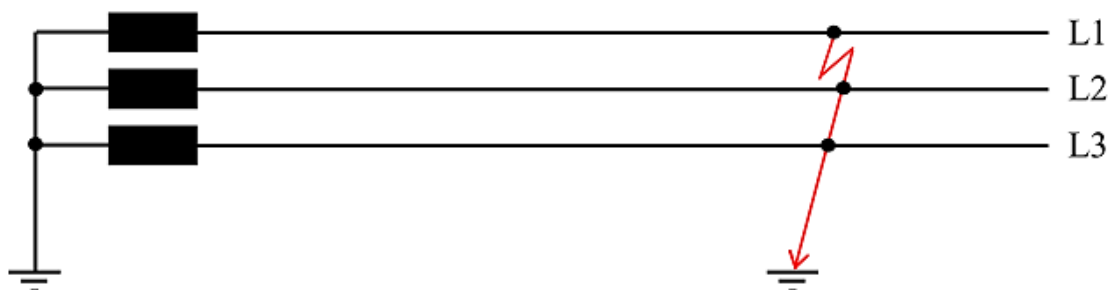
A) Souměrné

Trojfázový – vzniká při spojení všech tří fází v jednom místě elektrizační soustavy, všechny tři vodiče jsou stejně postiženy a vedou stejnou velikost zkratového proudu. Je typický pro kabelové sítě a dosahuje nejvyšších hodnot předpokládaného zkratového proudu.



Obr. 1.4: Schéma trojfázového zkratu [8]

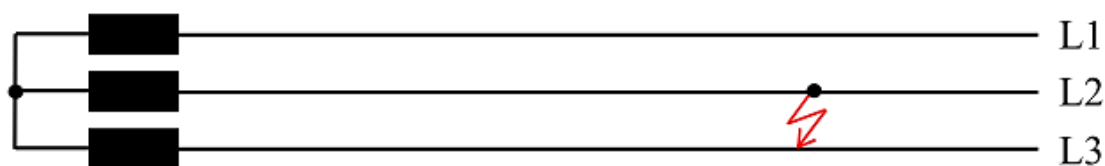
Trojfázový zemní – vzniká při spojení všech tří fází současně se zemí.



Obr. 1.5: Schéma trojfázového zemního zkratu [8]

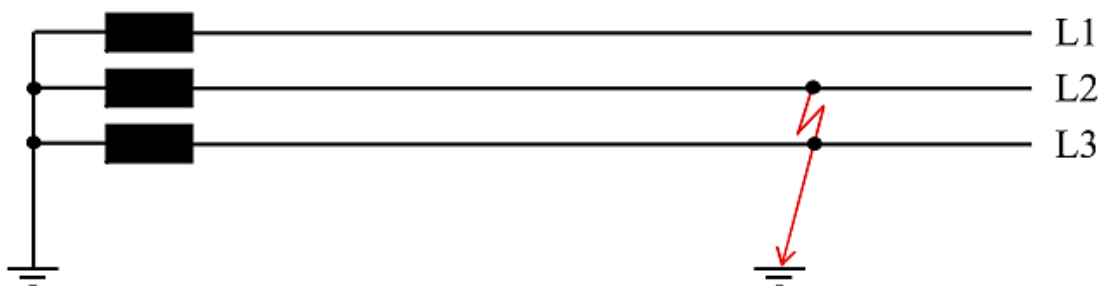
B) Nesouměrné

Dvoufázový – vzniká při vzájemném spojení libovolných dvou fází, z uvedených druhů zkratů dosahuje nejnižších hodnot zkratového proudu.



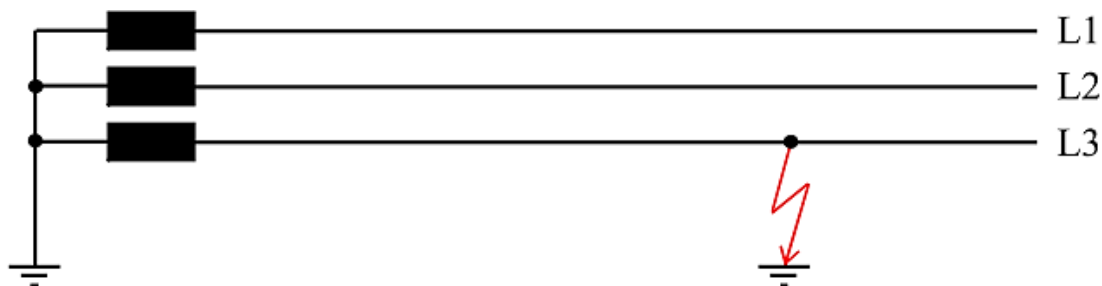
Obr. 1.6: Schéma dvoufázového zkratu fází L2 a L3 [8]

Dvoufázový zemní – vzniká při spojení dvou fází současně se zemí.



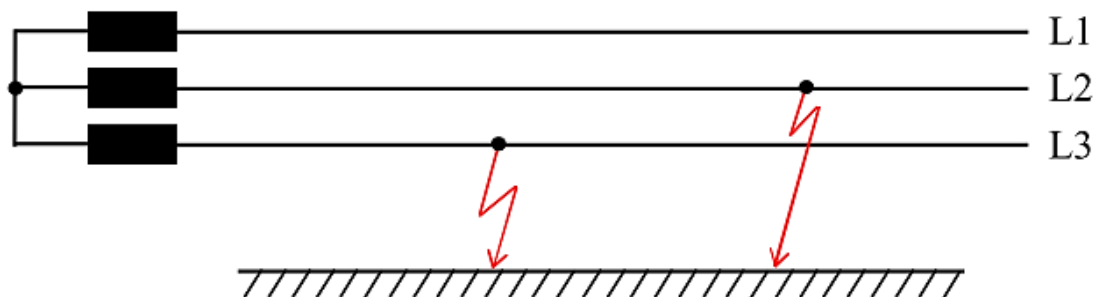
Obr. 1.7: Schéma dvoufázového zemního zkratu fází L2 a L3 [8]

Jednofázový – vzniká při spojení jedné fáze se zemí v soustavě s uzemněným uzlem, nemůže tedy vzniknout v izolované soustavě (zde se jedná o zemní spojení) a jeho hodnota může být vyšší než při trojfázovém zkratu.



Obr. 1.8: Schéma jednofázového zkratu fáze L3 [8]

Simultánní – vzniká při spojení dvou různých fází soustavy se zemí na dvou různých místech.



Obr. 1.9: Schéma simultánního zkratu fází L2 a L3 [8]

Možnosti spojení částí s různým potenciálem:

- a) Dokonalý zkrat – vzniká při dokonalém spojení fází, či fází a země nejčastěji pomocí kovového předmětu, impedance v místě spojení je zanedbatelná.
- b) Nedokonalý zkrat – vzniká při nedokonalém spojení částí s různými potenciály například pomocí větve stromu, impedance takového spojení je značná a má vliv na celkovou zkratového proudu.
- c) Obloukový zkrat – vzniká přiblížením či spojením vodičů na přeskokovou vzdálenost, kdy dochází ke snížení izolační pevnosti a vzniku elektrického oblouku. V průběhu zkratu se mění délka oblouku i jeho odpor a tím i velikost proudu. [8]

1.5.4. Výpočet zkratových proudů

Výpočty zkratů se provádějí především s ohledem na následující činnosti:

- Správné dimenzování elektrických zařízení s ohledem na tepelné a silové účinky zkratového proudu
- Kontrola vypínačů s ohledem na velikost a průběh zkratového proudu
- Správný návrh uzemňovacích soustav a stanovení dotykových a krokových napětí
- Správný návrh jisticích prvků, včetně nastavení elektrických ochran
- Kontrola napětíových poměrů při zkratu včetně posouzení výskytu přepětí [1]

Pro správné dimenzování elektrických zařízení se zjišťuje velikost zkratového proudu při nejnepříznivějších podmínkách, musí se také uvažovat s tím druhem zkratu, při kterém vznikají největší příslušné hodnoty. Početně nejčastější jsou zkraty jednofázové, přesto se v mnohých případech výpočet omezuje jen na trojfázový zkrat, protože jeho hodnoty jsou obvykle největší. [9]

Pro správný návrh a kontrolu činnosti elektrických ochran a jisticích prvků se počítají minimální zkratové proudy. [1]

Dle požadavku na výpočet příslušné velikosti zkratového proudu se volí určité výchozí podmínky:

Stanovení maximálního zkratového proudu:

- Využívá se napětíový součinitel c_{max} (pro VN: $c_{max} = 1,1$).
- Takové zapojení sítě dávající v místě zkratu největší zkratové proudy.
- Uvažované zdroje pracují se jmenovitým výkonem, napětím, účinníkem.
- Do konfigurace sítě je zahrnut vliv motorů.

- Odporů vedení (venkovního i kabelového) se uvažují při teplotě 20 °C. [9]

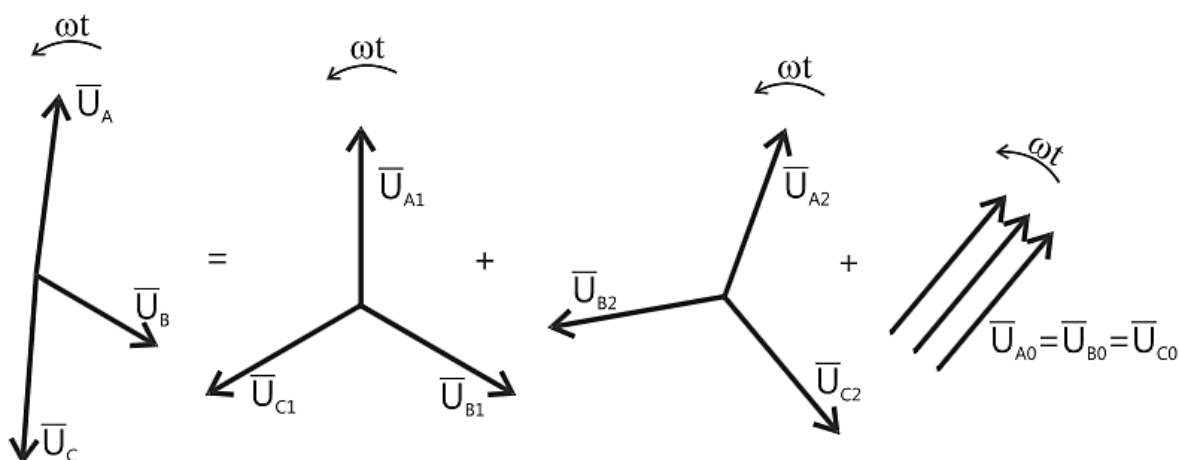
Stanovení minimálního zkratového proudu:

- Využívá se napětový součinitel $c_{min.}$ (pro VN: $c_{min} = 1,0$).
- Takové zapojení sítě s minimálními příspěvky z elektráren a síťových napaječů dávající v místě zkratu nejmenší zkratové proudy (např. při paralelním provozu transformátorů se uvažuje pouze s jedním).
- Pracuje omezený počet zdrojů ve stavu naprázdno se jmenovitým napětím.
- Do konfigurace sítě se neuvažuje vliv motorů.
- Odporů venkovního vedení se uvažují při teplotě 80 °C, odpory u kabelového vedení při maximální přípustné teplotě. [9]

Výpočty zkratových proudů jsou vždy prováděny s řadou zjednodušujících předpokladů, kdy výsledky jsou ve srovnání s fyzikální realitou spíše přibližné. Mezi daná zjednodušení patří, že se uvažuje s dokonalým kovovým zkratem a neuvažuje se vliv přechodového odporu v místě zkratu ani vliv elektrického oblouku. Dále se uvažuje, že po dobu zkratu nedochází k žádným změnám v síti, nemění se typ zkratu a zanedbávají se některé prvky příčných admitancí vedení a strojů. [1]

1.5.5. Metoda souměrných složek

Výpočet zkratových poměrů v elektrické síti jsou s výjimkou trojfázového zkratu nesymetrickým problémem. V programu Bizon Projektant probíhá výpočet zkratů pomocí metody souměrných složek, kdy dochází k rozkladu nesouměrného děje na několik jednoduchých souměrných dějů, které lze dle superpozice opět složit do celkového nesouměrného děje. Nejčastěji užívaná transformace nesymetrické soustavy na symetrickou je transformace dle Fortescua, která spočívá v rozkladu nesymetrických fázorů na součet tří symetrických složek. Tyto složky se nazývají: sousledná, zpětná a netočivá. [10]



Obr. 1.10: Rozklad nesymetrických fázorů napětí na součet tří symetrických složek [10]

Pro jednotlivé fázory platí:

$$\begin{aligned}\widehat{U}_A &= \widehat{U}_{A1} + \widehat{U}_{A2} + \widehat{U}_{A0} \\ \widehat{U}_B &= \widehat{U}_{B1} + \widehat{U}_{B2} + \widehat{U}_{B0} \\ \widehat{U}_C &= \widehat{U}_{C1} + \widehat{U}_{C2} + \widehat{U}_{C0}\end{aligned}\quad (1.27)$$

Zvolíme-li referenční fázi A, pak přejde soustava rovnic (1.27) na následující rovnice:

$$\begin{aligned}\widehat{U}_A &= \widehat{U}_{A1} + \widehat{U}_{A2} + \widehat{U}_{A0} \\ \widehat{U}_B &= a^2 \widehat{U}_{B1} + a \widehat{U}_{B2} + \widehat{U}_{B0} \\ \widehat{U}_C &= a \widehat{U}_{C1} + a^2 \widehat{U}_{C2} + \widehat{U}_{C0}\end{aligned}\quad (1.28)$$

Operátor a určuje fázový posun a platí pro něj:

$$\begin{aligned}a &= e^{j120^\circ} = (\cos(120^\circ) + j \sin(120^\circ)) = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = (\cos(240^\circ) + j \sin(240^\circ)) = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 + a + a^2 &= 0\end{aligned}\quad (1.29)$$

Označíme-li nesymetrickou soustavu fázorů napětí \widehat{U}_F a symetrickou \widehat{U}_S lze rovnice (1.28) a (1.29) přepsat do maticového tvaru:

$$\begin{aligned}[\widehat{U}_F] &= [\widehat{F}] \cdot [\widehat{U}_S] \\ \begin{bmatrix} \widehat{U}_A \\ \widehat{U}_B \\ \widehat{U}_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{U}_1 \\ \widehat{U}_2 \\ \widehat{U}_0 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (1.30)$$

Matice \widehat{F} se označuje jako Fortescuova transformační matice, jejíž determinant je různý od nuly a lze tedy provést její inverzi (1.31) a přejít od fázových hodnot napětí k hodnotám souměrných složek. [10]

$$[\widehat{F}]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\quad (1.31)$$

$$[\widehat{U}_S] = [\widehat{F}]^{-1} \cdot [\widehat{U}_F]\quad (1.32)$$

$$\begin{bmatrix} \widehat{U}_1 \\ \widehat{U}_2 \\ \widehat{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{U}_A \\ \widehat{U}_B \\ \widehat{U}_C \end{bmatrix}\quad (1.33)$$

Maticovému zápisu (1.32) odpovídá maticový zápis (1.33), což představuje soustavu rovnic napětí pro souslednou, zpětnou a netočivou složku. Součtem jednotlivých symetrických napětí a symetrických úbytků napětí na jednotlivých zkratových impedancích \widehat{Z}_1 , \widehat{Z}_2 , \widehat{Z}_0 lze získat symetrická napětí zdroje \widehat{E}_1 , \widehat{E}_2 , \widehat{E}_0 .

$$\begin{aligned}\widehat{E}_1 &= \widehat{U}_1 + \widehat{I}_1 \cdot \widehat{Z}_1 \\ \widehat{E}_2 &= \widehat{U}_2 + \widehat{I}_2 \cdot \widehat{Z}_2\end{aligned}\quad (1.34)$$

$$\widehat{E}_0 = \widehat{U}_0 + \widehat{I}_0 \cdot \widehat{Z}_0$$

V praxi lze napětí generátoru považovat vždy za souměrné a má tedy pouze souslednou složku, rovnice (1.34) pak lze přepsat do tvaru (1.35), což jsou základní rovnice pro řešení nesouměrných zkratů. [10]

$$\begin{aligned}\widehat{E}_1 &= \widehat{U}_1 + \widehat{I}_1 \cdot \widehat{Z}_1 \rightarrow \widehat{U}_1 = \widehat{E}_1 - \widehat{I}_1 \cdot \widehat{Z}_1 \\ 0 &= \widehat{U}_2 + \widehat{I}_2 \cdot \widehat{Z}_2 \rightarrow \widehat{U}_2 = -\widehat{I}_2 \cdot \widehat{Z}_2 \\ 0 &= \widehat{U}_0 + \widehat{I}_0 \cdot \widehat{Z}_0 \rightarrow \widehat{U}_0 = -\widehat{I}_0 \cdot \widehat{Z}_0\end{aligned}\tag{1.35}$$

Výpočty jednotlivých druhů zkratů jsou k dispozici v příslušné technické normě: ČSN EN 60909-0 ed. 2 (333022) – Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů.

2. Praktické využití SW Bizon Projektant ve výuce

Cílem práce je vytvořit 18 různých variant zadání pro předmět Projektování elektrických distribučních sítí (PEDS), jež spočívá v namodelování distribuční sítě 22 kV dle zadaného mapového podkladu, včetně vypracování dílčích úkolů, které jsou součástí textového zadání. K namodelování sítě se využije výpočetní program Bizon Projektant. Součástí práce je také využití daného softwaru k výpočtu zkratových poměrů v síti, čehož lze využít v předmětu Přechodné jevy v elektrizačních soustavách (PJES).

2.1. Popis použitého programu

Tato diplomová práce využívá školní vzdělávací verzi výpočetního programu Bizon Projektant, jejíž přesná verze je 4.60 build 777. Vzhledem k tomu, že se jedná o vzdělávací verzi, tak jsou zde určitá omezení při modelování elektrické sítě, a to:

Maximální počet uzlů:	16
Maximální počet linek:	20
Maximální počet transformátorů (dvou + trojvinutové):	2 + 2
Maximální počet injekcí:	4
Maximální počet spínačů:	5
Maximální počet ostatních:	40


Program pracuje ve dvou režimech. Jedním z nich je výpočetní režim, v němž se provádí manipulace se sítí, zadávání hodnot, ale především slouží k provádění výpočtů namodelované sítě, včetně posouzení a analýzy získaných dat. Druhý režim je editor, v němž se daná síť modeluje, slouží tedy k přidávání a odebírání jednotlivých prvků sítě (přípojnic, transformátorů, vedení, generátorů,...), dále tento režim umožňuje provádět změny již namodelovaných prvků, tedy měnit jejich umístění na pracovní ploše včetně polohy popisových polí. Přepínání mezi jednotlivými režimy lze provést klávesovou zkratkou ctrl + E.

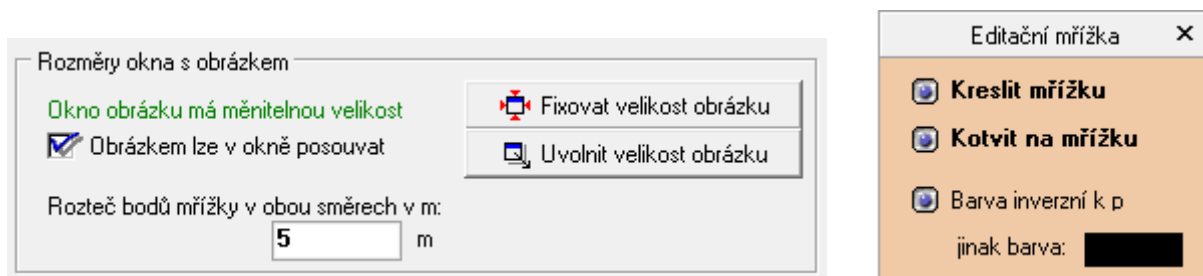
2.2. Instalace a základní nastavení programu

Instalace vzdělávací EDU verze programu Bizon Projektant se spustí automaticky po spuštění aplikace Setup_Bizon_Projektant_EDU.exe. Poté se objeví průvodce instalace programu, který po souhlasu s podmínkami licenční smlouvy umožní zvolit cílovou složku, do které se program nainstaluje (pozn. k instalaci je nutné mít k dispozici nejméně 630 MB volného místa na disku). Průvodce samozřejmě dále umožňuje vytvořit si zástupce na ploše PC pro snadné spuštění.

Po spuštění již nainstalovaného programu Bizon Projektant (EDU) se objeví informační panel, který potvrzuje, že se jedná o školní vzdělávací verzi programu, jejíž omezení jsou popsány v kapitole 2.1. Následně se zobrazí panel, který dává na výběr výpočet sítě buď na hladině NN nebo VN a vzhledem k tomu, že se semestrální projekt pro předmět Projektování elektrických distribučních sítí modeluje na napěťové hladině 22 kV, čili VN, tak je nutné kliknout na tlačítko „Chci počítat hlavně VN“. Poté dojde k přesměrování na pracovní plochu v režimu výpočtů. Zde je důležité si zkontrolovat nastavení parametrů programu kliknutím na submenu „Nastavení“ v horní liště a následně na položku „Parametry programu“. Zde

zkontrolovat, že v kartě „Obecné“ není zatrženo „Počítat trendy P, Q“ a v části odkud získávat odběry je zatrženo „Pouze zadané (ruční nebo přenesené) hodnoty“, doporučené je také mít zatrženo v části data ukládat zálohu dat ve vámi zvoleném časovém intervalu. Dále je potřeba se přesvědčit, že v kartě „Potvrzování“ není zatržena položka „Nové záznamy objektů“.

Stisknutím klávesové zkratky **ctrl + E** lze přepnout do režimu editoru, v němž se doporučuje, ještě před samotným kreslením schématu, nastavit pomocnou mřížku k lepšímu uchycování obrazových objektů, což se provede v horní liště kliknutím na submenu „Obrázek“ a poté „Vlastnosti obrázku“. Objeví se dialogové okno a zde v části rozměry okna s obrázkem (obr. 2.1) je zapotřebí přepsat rozteč bodů mřížky v obou směrech v metrech (např. 5 m), přepis je poté nutné potvrdit tlačítkem „OK“. V liště pomůcek je následně nutné zatrhnout, po kliknutí na ikonu „Panel editační mřížky“ , jednotlivé možnosti pro editaci mřížky, a to „Kreslit mřížku“ – dojde k zobrazení mřížky, dále „Kotvit mřížku“ – dojde k přichycování objektů na body mřížky a „Barva inverzní k pozadí“ – barva bodů mřížky bude na černém pozadí bílá.



Obr. 2.1: Nastavení pomocné mřížky

K zobrazení určitých informací či číselných hodnot u daného prvku sítě se využívají tzv. **visačky**. Jejich nastavení se provádí v režimu výpočtů v submenu „Nastavení“ a výběrem položky „Parametry visaček“. V následně vyobrazeném okně si lze vybrat z nabízených objektů sítě (uzly, vedení, transformátory,...) právě ty parametry, které nás zajímají. Pro uzly jsou to především jméno, P měřený, Q měřený a E uzlu. U vedení jsou důležité parametry jméno, délka, relativní proud a činné ztráty. Visačky lze u jednotlivých prvků sítě také graficky odlišit ať už pozadím či barvou písma, tuto grafickou úpravu lze provést při zvoleném typu objektu v dolní části nastavení visaček ve vlastnostech vybraného typu objektu.

2.3. Zadání semestrálního projektu do předmětu PEDS

Na základě daného mapového podkladu namodelujte v programu DAISY Bizon Projektant distribuční síť 22 kV. Síť je v rámci jedné varianty zadání tvořena jednou napájecí trafostanicí s převodem 110/22 kV, venkovními vedeními 22 kV AlFe6 s různým průřezem a délkou v řádu jednotek km včetně T-odbočky, odběrnými místy 22 kV definovanými určitou velikostí odebíraného výkonu (stovky kW) a také účínkem a jedním zdrojem, jež představuje synchronní generátor s výkonem jednotek MW (velikost se určí jakožto výsledek vypracování bodu B), generátor je s napájecí trafostanicí vhodně propojen pomocí dvou paprsků vedení. Oba paprsky jsou navzájem propojeny záložním vedením, jež je v normálním provozním stavu vypnuté, toto vedení vychází vždy alespoň z jednoho konce daného paprsku.

Po namodelování sítě v programu DAISY Bizon Projektant je dále nutné splnit následující úkoly:

A) Vypočítat ustálený chod sítě s odpojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením, tedy zjistit hodnoty napětí ve všech uzlech a poměrné (procentní) zatížení jednotlivých prvků sítě (vedení, transformátor).

B) Pomocí výpočtu ustáleného chodu sítě stanovit limitní instalovaný činný výkon zdroje (při $\cos(\varphi) = 1$) tak, aby v dané síti došlo ke změně napětí (nejen v přípojném bodě zdroje) oproti stavu bez zdroje v maximální výši 2 %.

C) Pro základní konfiguraci sítě (odpojené záložní vedení) zkonstruovat grafickou závislost rozložení napětí $U = f(l)$ v celé síti, resp. na daném paprsku včetně doplnění limitní přímky dovoleného úbytku napětí (5 % z napětí na začátku paprsku), a to jak pro síť se zdrojem, tak i bez něj. Dále pro základní konfiguraci sítě zkonstruovat grafickou závislost procentní změny napětí $\Delta U_{\%} = f(l)$ v celé síti, případně pouze na paprsku, kde je změna napětí největší po připojení zdroje, včetně doplnění limitní přímky 2 %.

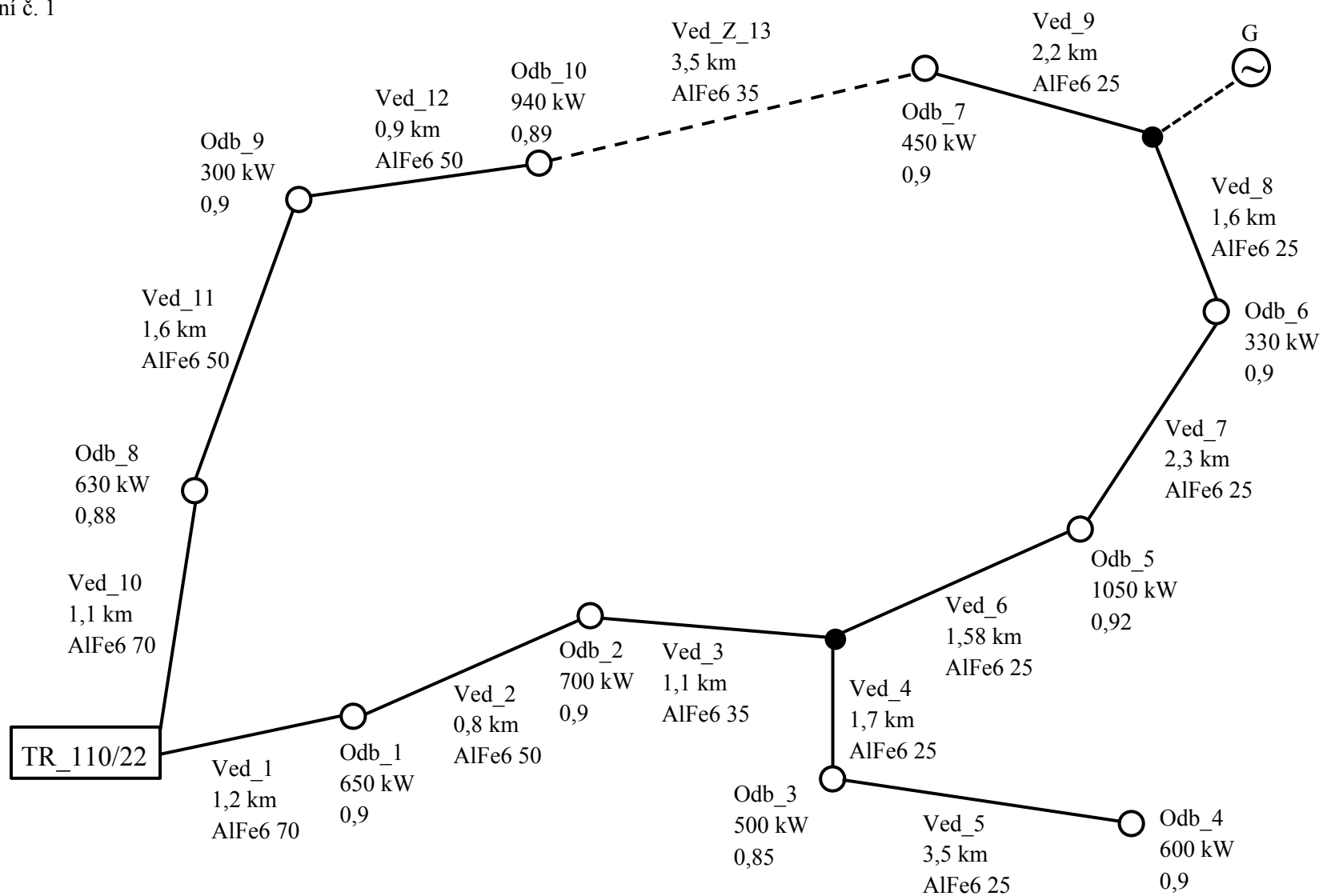
D) Vypočítat ustálený chod sítě s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením, a to pro šest různých, vhodně zvolených hodnot jalového výkonu zdroje (3 hodnoty kapacitního a 3 hodnoty induktivního jalového výkonu). Na základě vypočtených hodnot zkonstruovat grafickou závislost $\Delta U = f(l)$ změny napětí (oproti stavu bez zdroje) na vzdálenosti od přípojnice 22 kV napájecího transformátoru, přičemž graf bude obsahovat i křivku s nulovým jalovým výkonem, tedy dohromady bude v grafu 7 křivek. Dále zkonstruovat sloupcový graf závislosti celkových činných ztrát sítě (ΔP) na zvolených hodnotách jalového výkonu zdroje.

E) Vypočítat ustálený chod sítě s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením, a to pro sedm různých hodnot činného výkonu zdroje od 0 do jeho limitní hodnoty při účinníku $\cos(\varphi) = 1$ a dále zkonstruovat sloupcový graf závislosti celkových činných ztrát sítě (ΔP) na zvolených hodnotách činného výkonu zdroje.

F) Vypočítat ustálený chod sítě s připojeným zdrojem i záložním vedením a současně s odpojeným jedním a poté i druhým paprskem na vývodu z přípojnice 22 kV napájecího transformátoru. Pro tyto dvě náhradní konfigurace sítě zjistit poměrné (procentní) zatížení jednotlivých prvků sítě (vedení, transformátor) zda je či není v uzlech překročen dovolený úbytek napětí (5 % z napětí na začátku paprsku). Ze získaných hodnot velikostí napětí poté zkonstruovat grafickou závislost $U = f(l)$, tj. rozložení napětí v celé síti.

G) Ekonomické zhodnocení navržené sítě (v její základní konfiguraci) vycházející z investičních nákladů na síť, tj. z nákladů na transformovnu 110/22 kV a z nákladů na vedení 22 kV (velikosti délek vedení dle průřezu), dále z celkových činných ztrát, celkového zatížení a velikosti limitního výkonu generátoru. Výstupem bude graf znázorňující kumulovaný cash-flow.


Zadání č. 1

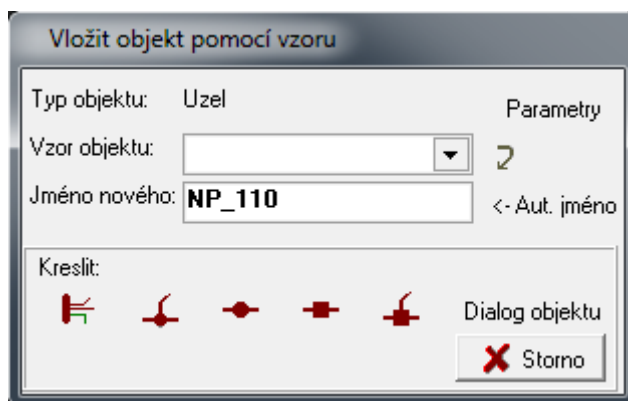


Obr. 2.2: Mapový podklad č. 1

2.4. Postup modelování dle zadaného mapového podkladu

Na obr. 2.2 je zadání jedné varianty úlohy, síť je koncipována jako paprsková ve venkovní oblasti a je zadána jednou napájecí trafostanicí s převodem 110/22 kV, 10 rozptýlenými odběrnými místy, které jsou určeny činným výkonem a účíníkem, jednotlivé odběry jsou propojeny vedeními AlFe6 o různém průřezu a délce. Současně se v síti nachází i zdroj - synchronní generátor, který reprezentuje kogenerační jednotku v bioplynové stanici.

Prvním krokem je vytvoření napájecí trafostanice, která je v programu reprezentována modelem dvouvinutového transformátoru, jež propojuje 2 přípojnice o různých napěťových hladinách. Primární vinutí je napojeno na přípojnicí o velikosti napětí 110 kV a sekundární vinutí na přípojnicí o velikosti napětí 22 kV. Čili při modelování dvouvinutového transformátoru je nezbytné v režimu editor vytvořit jednu přípojnicí kliknutím levého tlačítka myši v horní liště pracovní plochy na submenu „Prvky sítě“ a poté na první položku „Uzel“ , případně lze vybrat tuto ikonu přímo v liště pomůcek resp. pomocí panelu objektů na pravé straně plochy. Poté se zobrazí dialog k zadání jména uzlu a výběru typu uzlu (obr. 2.3), přičemž se k nakreslení, po zadání jména (např. NP_110, nebo implicitně využitím tlačítka automatické jméno), vybere první ikona „Přípojnice“. Tato přípojnice se kreslí kliknutím levého tlačítka myši tam, kde má být začátek přípojnice a opětovným kliknutím levého tlačítka myši se určí konec přípojnice, kresba je ovšem ukončena buď kliknutím pravého, nebo dvojklikem levého tlačítka myši.




Obr. 2.3: Dialogové okno uzlu

Po ukončení kreslení přípojnice, jež reprezentuje primární přípojnicí transformátoru, se zobrazí dialog tvorby uzlu, v němž je nutné zvolit typ uzlu napájecí, velikost jmenovitého napětí 110 kV a volbu potvrdit tlačítkem „OK, vytvořit“. Většinou se poté zobrazí informační panel, který uvádí, že v síti existuje jen jeden napájecí uzel, referenční uzel nemá smysl, ten stačí jen potvrdit tlačítkem „OK“.

Obr. 2.4: Dialog tvorby uzlu

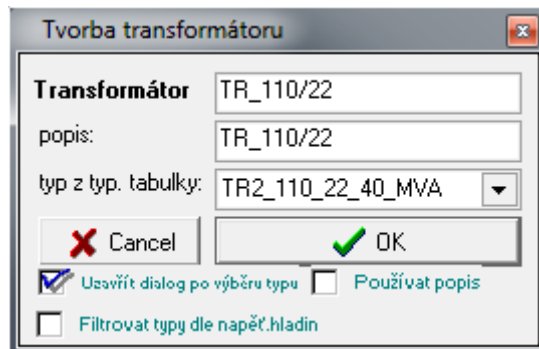
Analogicky lze nakreslit i druhou přípojnicí, jež reprezentuje sekundární stranu transformátoru, ovšem zde je nutné v dialogovém oknu uzlu přepsat přípojnicí (např. PP_22) a v dialogovém oknu tvorby uzlu vybrat typ nejlépe „pomocný“ a velikost jmenovitého napětí přepsat na 22 kV.

Kreslení transformátoru lze opět provést třemi způsoby, a to v hlavním menu editoru přes submenu „Prvky sítě“ a výběrem položky „Transformátor“ , případně přes ikonu v liště pomůcek nebo přes panel objektů. Po rozkliknutí dané ikony se zobrazí dialogové okno, v němž se napíše název kresleného transformátoru (např. TR_110/22) a poté se zvolí tlačítko „Kreslit“.

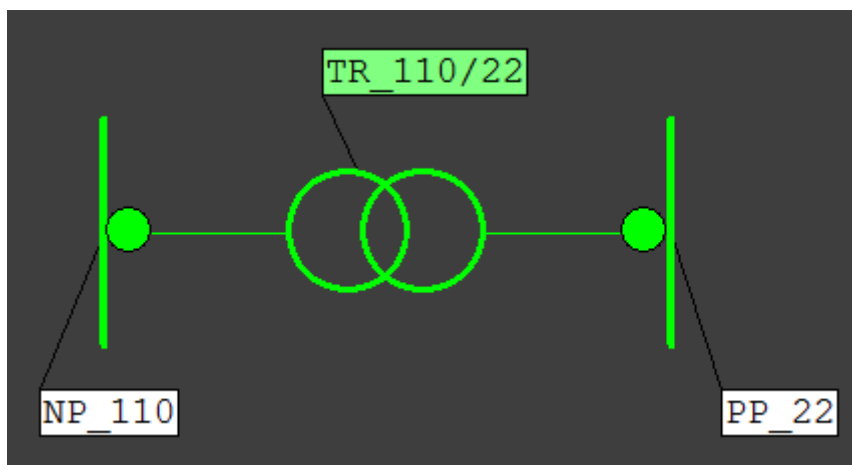
Obr. 2.5: Dialogové okno transformátoru

Samotné kreslení transformátoru je složeno ze tří částí – umístění transformátoru, kresba primárního a kresba sekundárního vývodu. Prvním kliknutím levého tlačítka myši mezi přípojnici dojde k umístění středu transformátoru, jež je označeno červeným kolečkem. Z daného místa se poté kreslí primární vývod na primární přípojnicí, lze si povšimnout, že již samotný program navádí pomocí daného piktogramu u kurzoru myši k umístění vývodu na primární stranu, následně se kreslí sekundární vývod na sekundární přípojnicí, opět doprovázený daným piktogramem.

Po namodelování transformátoru se objeví dialogové okno, ve kterém se vybere typ požadovaného transformátoru, jehož parametry jsou v programu již přednastaveny. Po rozkliknutí typu z typové tabulky je na výběr pouze jeden transformátor s převodem 110/22, jiný transformátor s tímto převodem program nemá implementován. Volba se poté potvrdí stisknutím tlačítka „OK“. Transformátor je poté již namodelován.



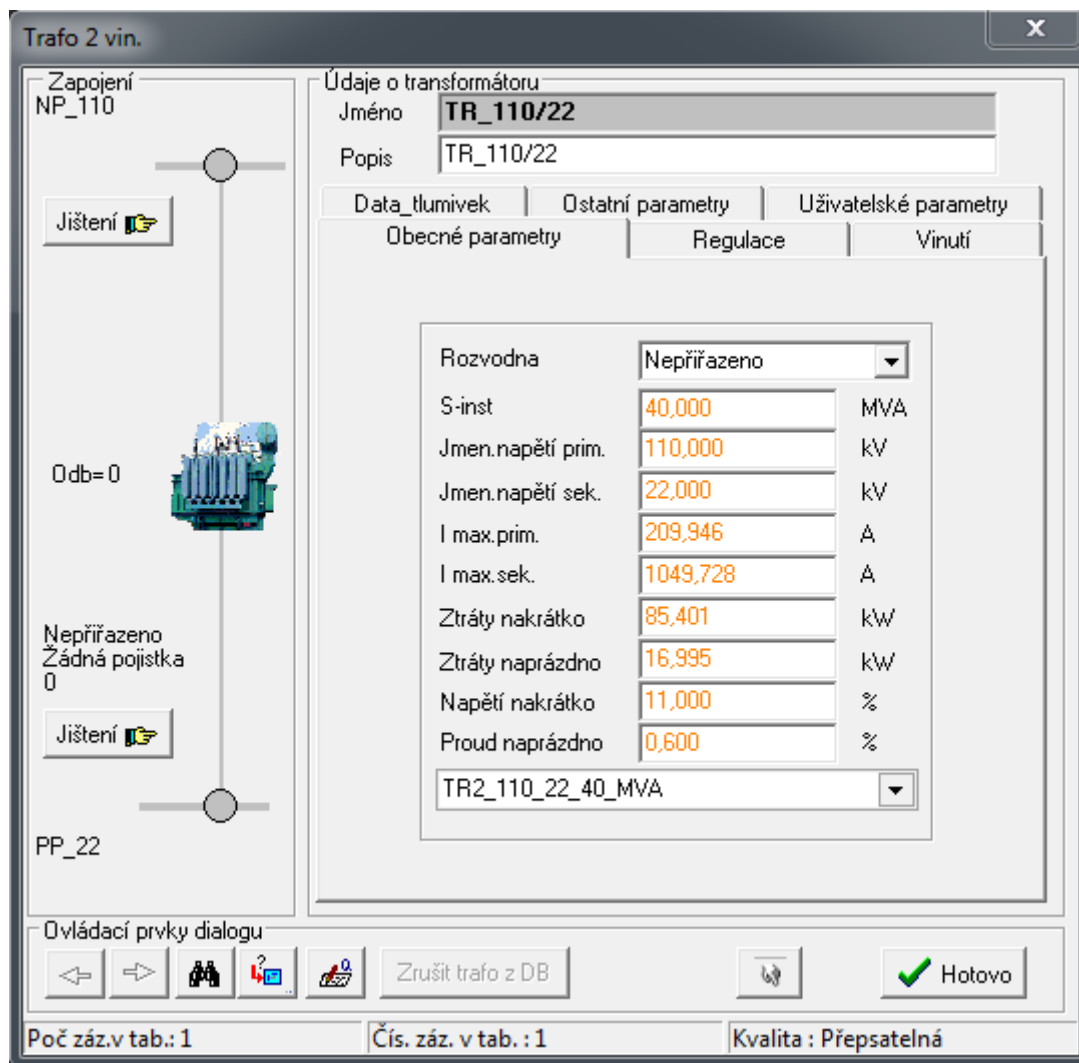
Obr. 2.6: Dialogové okno k výběru transformátoru



Obr. 2.7: Namodelovaný transformátor

Parametry transformátoru jsou k dispozici kliknutím pravého tlačítka myši na již namodelovaný transformátor s následným výběrem dialogu objektu.

Kliknutím na model transformátoru v režimu výpočtů je v případě potřeby umožněna regulace napětí přepínáním odboček vinutí v rozsahu od 8 do -8, přičemž čím vyšší odbočka bude na transformátoru nastavena, tím nižší napětí bude na jeho výstupu.



Obr. 2.8: Dialog objektu transformátoru s obecnými parametry

Modelování odběrových uzlů

Kreslení odběrových uzlů je analogické modelování přípojníc, čili opět kliknutím na ikonu „Uzel“ se objeví dialogové okno viz obr. 2.9, v němž se napíše příslušný název (např. Odb_1) a poté se klikne na třetí tlačítko z nabízených typů uzlů, tedy „Meziodběr“, ten je následně reprezentován na pracovní ploše kolečkem s označením TS (trafostanice), zároveň se objeví dialogové okno k zadání parametrů uzlu, v němž se změní typ uzlu na *odběrový*, velikost jmenovitého napětí je nutné přepsat na 22 kV a dle zadání dále napsat příslušnou velikost odebraného činného (P odběr (kW)) a jalového výkonu (Q odběr (kvar)).

např. pro P odběr = 650 kW, $\cos(\varphi) = 0,9$

$$Q \text{ odběr} = \frac{P_{\text{odběr}}}{\cos \varphi} \cdot \sin(\arccos(0,9)) = \frac{650}{0,9} \cdot \sin(\arccos(0,9)) = 314,809 \text{ kvar}$$

Vše se poté potvrdí stisknutím tlačítka „OK, vytvořit“. Parametry lze samozřejmě ověřit i kliknutím pravého tlačítka myši na již vytvořený uzel výběrem položky dialog objektu.

Obr. 2.9: Parametry odběrového uzlu


Obdobným způsobem se namodelují i zbývající odběrové uzly dle zadání.

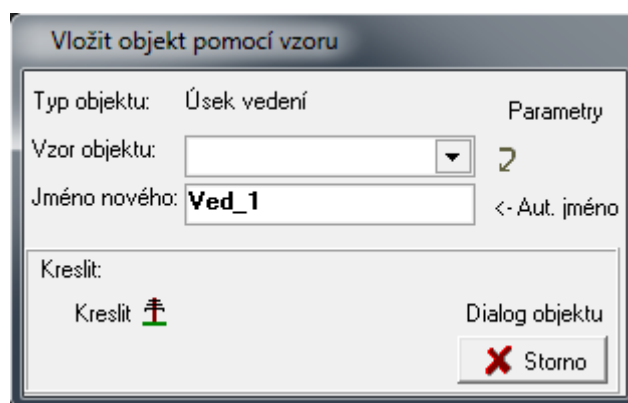
Tvorba T-uzlu

Jedná se o pomocný uzel, který se využívá v případech, kdy dochází k dělení vedení pro napojení odbočujícího vedení zpravidla s menší velikostí průřezu. Kreslí se opět kliknutím na ikonu „Uzel“, napíše se nové jméno uzlu (např. PU_1) a z nabízených tlačítek se vybere druhé v pořadí, tedy „T-uzel“. V následujícím dialogovém okně se provede kontrola, že pomocný uzel je dimenzován pro napětovou hladinu 22 kV, poté tlačítkem „OK, vytvořit“ dojde ke vzniku pomocného uzlu.

Modelování vedení

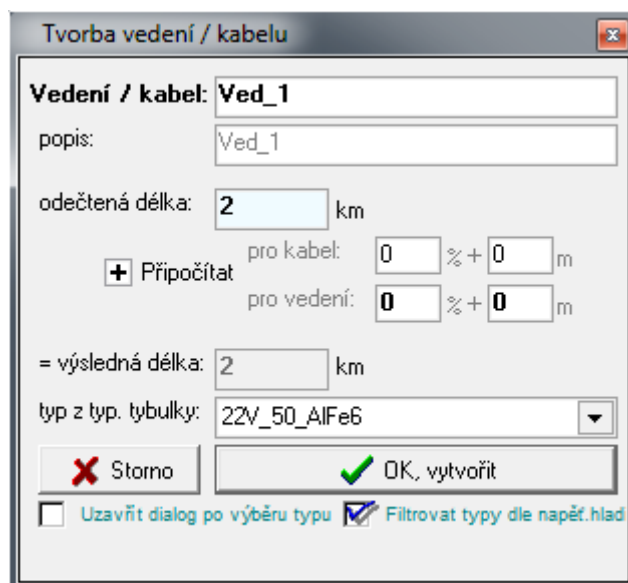
Pokud jsou v editoru správně namodelovány alespoň dva uzly mající stejnou velikost jmenovitého napětí, lze je vzájemně propojit úsekem vedení, kdy daný úsek vedení lze namodelovat jako vedení kabelové, jež program vykreslí čárkovaně, nebo jako vedení venkovní, jež program vykreslí čarou plnou.

Úsek vedení lze modelovat výběrem v hlavním menu přes submenu „Prvky sítě“ kliknutím na položku „Úsek vedení“ , případně pomocí stejné ikony v liště pomůcek nebo v panelu nástrojů. Po rozkliknutí se objeví dialogové okno (obr. 2.10), v němž se napíše jméno nově kresleného vedení (např. Ved_1) a poté se klikne na tlačítko „Kreslit“. Je důležité volit názvy jednotlivých vedení rozdílně, protože pokud se nepřepíše jméno nově kresleného vedení, tak program bude do již vytvořené sítě kreslit vedení, které je již v databázi, program samozřejmě o této skutečnosti bude uživatele informovat a po kladné odezvě může dojít k přepojení již stávajícího vedení.

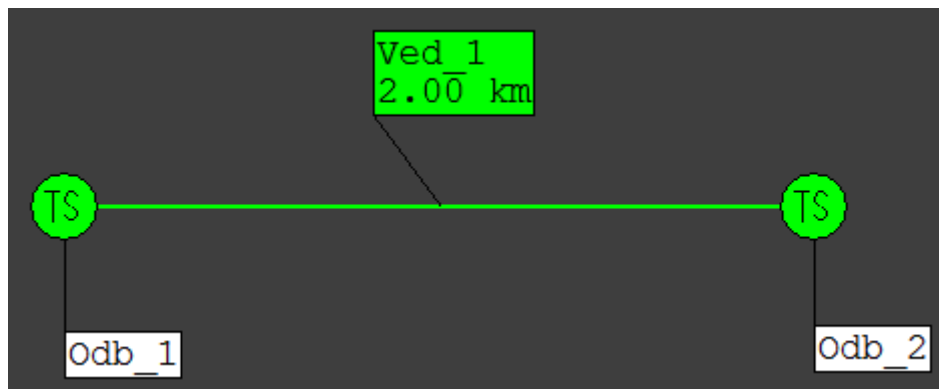


Obr. 2.10: Dialogové okno vedení

Začátek vedení se kreslí kliknutím levého tlačítka myši na již vytvořený uzel, zde dojde k automatickému vytvoření vývodu, z jehož místa lze kurzorem myši natahovat čáru nově vytvořeného vedení, v této fázi kreslení lze dle potřeby čáru kresleného vedení zalomit stisknutím a následným uvolněním levého tlačítka myši, vznikne zlom a začne se natahovat další část vedení. Kresba vedení je ukončena v okamžiku kliknutí na další uzel. Poté se objeví dialogové okno, v němž je potřeba zadat příslušnou délku (v km) a typ daného vedení (např. 22V_50_AlFe6), viz obr. 2.11. Potvrzením tlačítka „OK, vytvořit“ dojde k namodelování nového vedení (obr. 2.12).





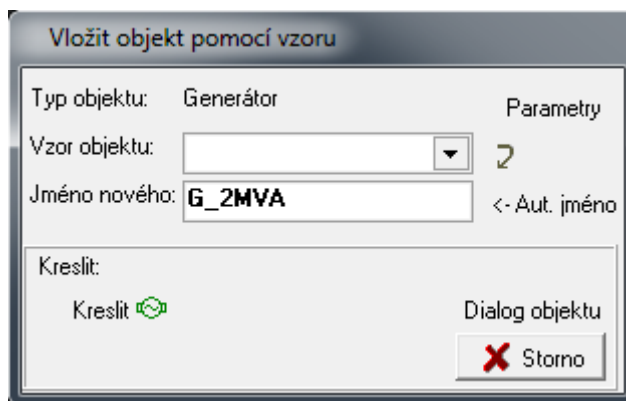
Obr. 2.11: Dialog k zadání délky a typu vedení



Obr. 2.12: Namodelované vedení mezi dvěma odběrovými uzly

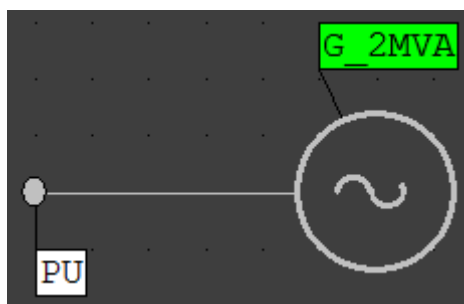
Modelování generátoru

Generátor spadá mezi tzv. injekce, jedná se o větev, která je zapojena mezi uzel a zem a odpovídá dodávce dané velikosti výkonu (P , Q) do sítě. Injekci lze přidat přes hlavní menu výběrem submenu „Prvky sítě“ a položky „Injekce“ , případně pomocí ikony „Generátor“  v liště pomůcek, resp. pomocí stejné ikony v panelu nástrojů. Po otevření ikony se zobrazí dialogové okno (obr. 2.13), v němž se napíše jméno generátoru (např. G_2MVA), poté se klikne na tlačítko „Kreslit“.



Obr. 2.13: Dialogové okno generátoru

Při kreslení se nejprve kliknutím levého tlačítka myši určí umístění generátorové injekce reprezentované červeným kolečkem (podobně jako u transformátoru), dále se kreslí čára vývodu injekce, která je ukončena kliknutím na daný uzel. Namodelovaný generátor je na obr. 2.14. Po otevření dialogového okna generátoru je zapotřebí kliknout pravým tlačítkem myši na již vytvořený model a vybrat položku „Dialog objektu“. Zobrazí se okno k zadávání parametrů generátoru, zde se v části „Údaje o točivém stroji“ vybere z nabízených možností typu točivého stroje stroj „Synchronní“ a do kolonek pro jmenovité a provozní parametry se napíšou velikosti již dle konkrétního zadání, pozn. svorkové napětí 22 kV je pro všechna zadání stejné. Parametry generátoru se poté potvrdí kliknutím na tlačítko „Hotovo“



Obr. 2.14: Namodelovaný generátor

Injekce Záznam 1/ 1

Zapojení
PU

Jméno: G_2MVA
Popis: G_2MVA
Typ injekce: Generátor

Generátor | Ostatní parametry | Externí parametry

Údaje o točivém stroji

Typ-gen: Neznámý
Typ-toc: Synchronní

Jmenovité parametry		Zkratové parametry	
U svorkové	22,000 kV	Rd1"	0,000 %
S-inst.	2000,000 kVA	Xd1"	0,000 %
CosFiN	1,000 -	Rd0"	0,000 %
		Xd0"	0,000 %
		Xd	0,000 %
		Xd'	0,000 -
		RX	0,000 Ohm

Provozní parametry

P dodávka: 1800,000 kW
Q dodávka: 0,000 kVAr
CosFi: 1,000 -

Regulace napětí

Dodržovat napětí: Ne
U budiče: 0,000 kV

Q-min: 0,000 kVAr
Q-max: 0,000 kVAr

← → [Icons] [Zrušit injekci z DB] [Hotovo]

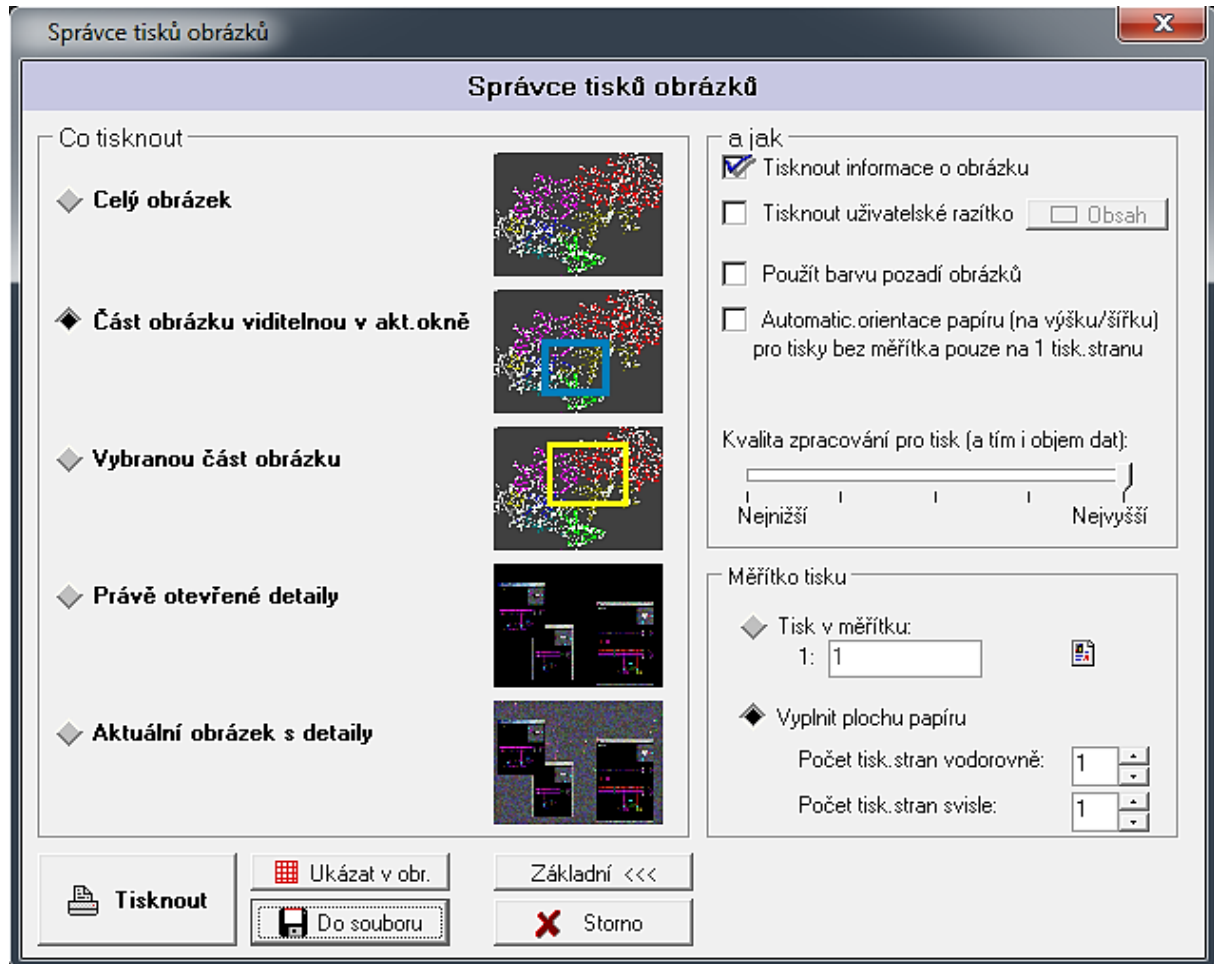
Obr. 2.15: Parametry generátoru

Uložení namodelované sítě

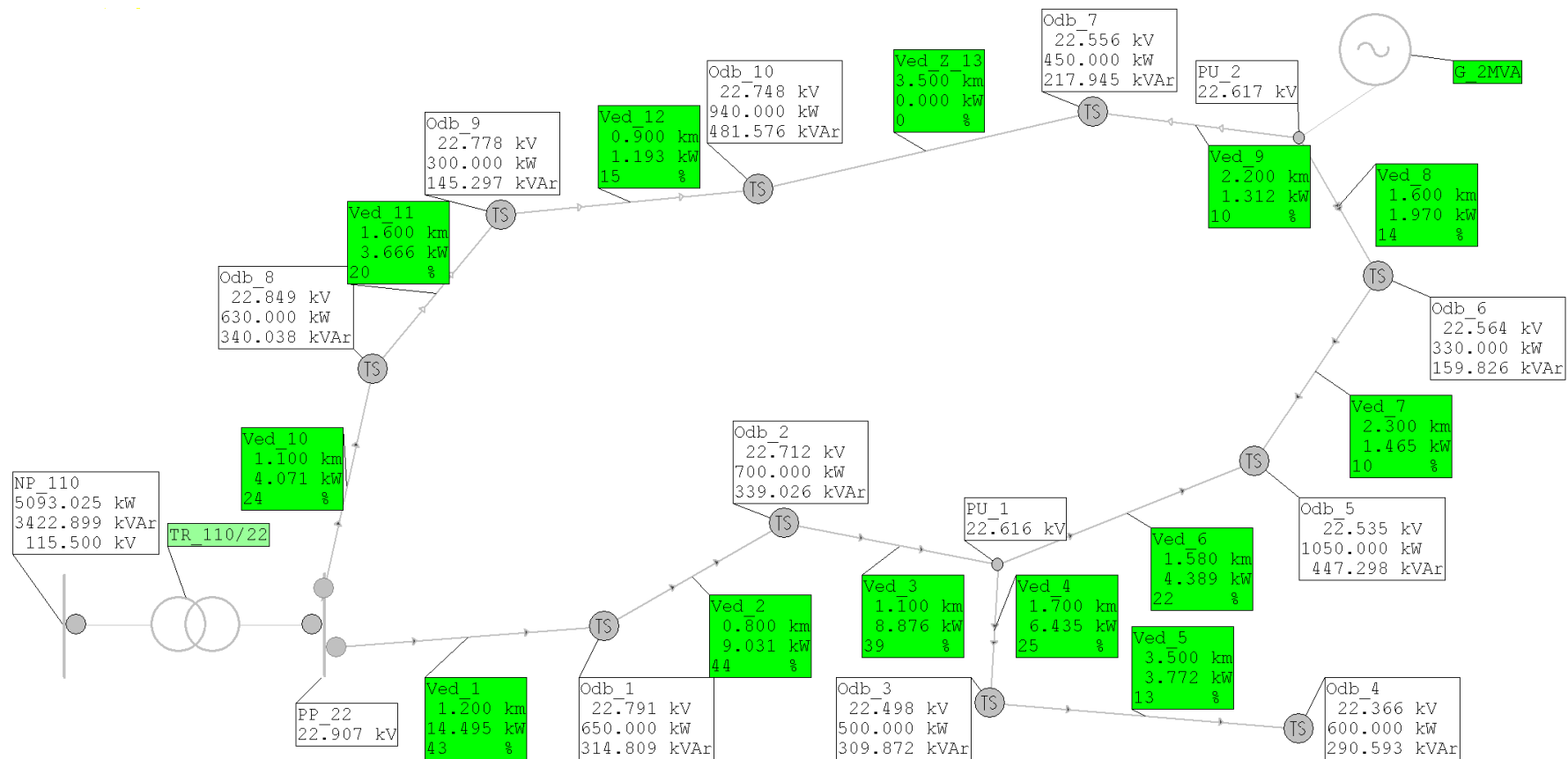
Před samotným uložením obrázku je nezbytné se přesvědčit, zda ve vrstvách v pravém panelu pracovní plochy jsou viditelné visačky, tedy není přeškrtnuta ikona „brýlí“ a zároveň je aktivována vedlejší ikona „Tisknout“ . Pro názornější přehled toků výkonů je také vhodné aktivovat vrstvu „Šipky toků“.

Výsledné namodelované schéma lze poté nejlépe uložit jako obrázek v režimu výpočtů kliknutím na submenu „Obrázky“ a poté na položku „Tisk obrázku“. V následně vyobrazeném

okně je nutné v části „Co tisknout“ zaškrtnout „Část obrázku viditelnou v akt. okně“. Dále kliknutím na tlačítko „Nastavení“ je vhodné vybrat kvalitu obrázku jako nejvyšší. Poté kliknutím na tlačítko „Do souboru“ dojde k přesměrování na místo, kde dojde k uložení obrázku, následně se zobrazí okno ohledně tisku obrázku, které stačí jen potvrdit tlačítkem „OK“.



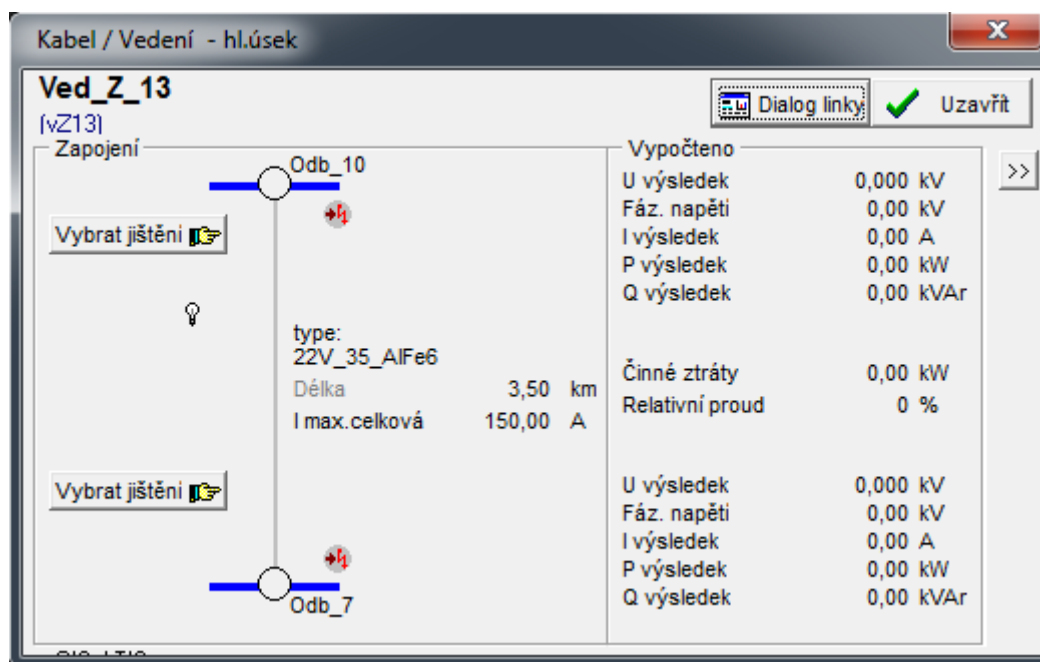
Obr. 2.16: Dialogové okno k uložení obrázku






Obr. 2.17: Namodelované schéma v programu DAISY Bizon Projektant (vypočtené hodnoty již s připojeným zdrojem)

2.5. Řešení dle zadání

V bodě A se požaduje výpočet ustáleného chodu sítě s odpojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením. Připojení či odpojení určitého prvku sítě lze provést v režimu výpočtů kliknutím levého tlačítka myši na daný prvek. Kliknutím např. na vedení se zobrazí dialogové okno (obr. 2.18), v němž je možnost připojit, či odpojit daný úsek vedení. Na obr. 2.18 je daný úsek vedení odpojený, což značí i ikona vypnuté žárovky, připojení se provede kliknutím na dané uzly (prázdná kolečka), zároveň dojde k „rozsvícení“ žárovky, na kterou když se umístí kurzor myši, tak se objeví informace: „Vedení je zapnuto“. Obdobným způsobem lze provést změnu zapojení také kliknutím pravého tlačítka myši na daný prvek sítě výběrem dialogu objektu.



Obr. 2.18: Dialogové okno umožňující změnu zapojení

Pokud jsou tedy ve vypnutém stavu oba požadované objekty, lze v režimu výpočtů v submenu „Výpočty“ přes položku „Chod sítě“ provést ustálený chod sítě. Stejnou operaci umožňuje i ikona „Výpočty ustáleného chodu sítě“  v liště pomůcek, případně klávesa F7. Poté se objeví informační panel potvrzující dokončení výpočtu, který zároveň umožňuje zobrazit výsledky v textovém výpisu, případně lze výsledky zobrazit kliknutím na ikonu „Otevřít tabulku“  v liště pomůcek, v této tabulce si lze vybrat typ prvku (fyzické uzly, transformátory, úseky vedení,...) a vypočtené parametry, které nás zajímají. Tabulku lze exportovat do tabulkového procesoru MS Excel kliknutím na ikonu „Otevřít obsah tabulky v MS Excel“ .

Tab. 2.1: Vypočtené hodnoty napětí a dodávek, resp. odběrů výkonů pro fyzické uzly

Jméno	Typ uzlu	U (kV)	P_{dod} (kW)	P_{odb} (kW)	Q_{dod} (kvar)	Q_{odb} (kvar)
NP_110	Napájecí	115,5	6 270,127	0	3 478,613	0
PP_22	Pomocný	22,903	0	0	0	0

Odb_1	Odběrový	22,760	0	650	0	314,809
Odb_2	Odběrový	22,655	0	700	0	339,026
PU_1	Pomocný	22,516	0	0	0	0
Odb_3	Odběrový	22,397	0	500	0	309,872
Odb_4	Odběrový	22,265	0	600	0	290,593
Odb_5	Odběrový	22,336	0	1 050	0	447,298
Odb_6	Odběrový	22,223	0	330	0	159,826
PU_2	Pomocný	22,177	0	0	0	217,945
Odb_7	Odběrový	22,114	0	450	0	0
Odb_8	Odběrový	22,846	0	630	0	340,038
Odb_9	Odběrový	22,774	0	300	0	145,297
Odb_10	Odběrový	22,744	0	940	0	481,576

Tab. 2.2: Vypočtené hodnoty ztrát a relativního proudu pro transformátor

<i>Jméno</i>	<i>Typ transformátoru</i>	ΔP_T (kW)	I_{rel} (%)
TR_110/22	TR2_110_22_40_MVA	21,011	17

Tab. 2.3: Vypočtené hodnoty ztrát a relativního proudu pro vedení

<i>Jméno</i>	<i>Typ vedení</i>	<i>Délka l (km)</i>	ΔP_V (kW)	I_{rel} (%)
Ved_1	22V_70_AlFe6	1,2	23,4244	54
Ved_2	22V_50_AlFe6	0,8	16,0049	59
Ved_3	22V_35_AlFe6	1,1	18,2532	56
Ved_4	22V_25_AlFe6	1,7	6,4937	25
Ved_5	22V_25_AlFe6	3,5	3,8071	14
Ved_6	22V_25_AlFe6	1,58	15,5845	41
Ved_7	22V_25_AlFe6	2,3	4,2608	18
Ved_8	22V_25_AlFe6	1,6	0,9905	10
Ved_9	22V_25_AlFe6	2,2	1,3648	10
Ved_10	22V_70_AlFe6	1,1	4,072	24
Ved_11	22V_50_AlFe6	1,6	3,6671	20
Ved_12	22V_50_AlFe6	0,9	1,1933	15
Ved_Z_13	22V_35_AlFe6	3,5	0	0

Velikost celkového zatížení sítě je dána sumou všech odběrů:

$$P_{cz} = \sum_{i=1}^{10} P_{odb(i)} = 6\,150 \text{ kW} \quad (2.1)$$

Kromě velikosti samotného zatížení musí transformátor dále krýt celkové ztráty, které vznikají v důsledku průchodu proudu samotným transformátorem (21,011 kW) a také jednotlivými úseky vedení (Tab. 2.3 sloupec ΔP_V). Velikost celkových činných ztrát je tedy dána součtem činných ztrát transformátoru a všech úseků vedení.

$$\Delta P_c = \Delta P_T + \sum_{i=1}^{13} \Delta P_{V(i)} = 21,011 + 99,116 = 120,127 \text{ kW} \quad (2.2)$$

Součet celkového zatížení a celkových činných ztrát poté odpovídá celkové dodávce potřebného výkonu P_{dod} napájecího transformátoru.

Procentní zatížení vedení a transformátoru je dáno tzv. relativním proudem I_{rel} , jež určuje podíl proudu tekoucího daným prvkem a jeho jmenovitým proudem vynásobený 100 %. S ohledem na předpokládaný nárůst spotřeby elektrické energie se doporučuje, aby velikost procentního zatížení u vedení pro základní konfiguraci sítě byla do 60 %.

V bodě B je nutné zjistit limitní činný výkon zdroje, aby nebyla překročena dovolená změna napětí, čili je nutné jednak připojit generátor přes dialog objektu a dále měnit v dialogu parametrů generátoru velikost jednak instalovaného výkonu zdroje, a jednak dodávku činného výkonu. Poté se provádí ustálený chod sítě a porovnávají se výsledky napětí před připojením U_1 a po připojení U_2 zdroje, přičemž se zjišťuje, zda odchylka napětí je do 2 %. Pokud není, je potřeba upravit hodnotu instalovaného a následně i činného výkonu zdroje v dialogu generátoru.

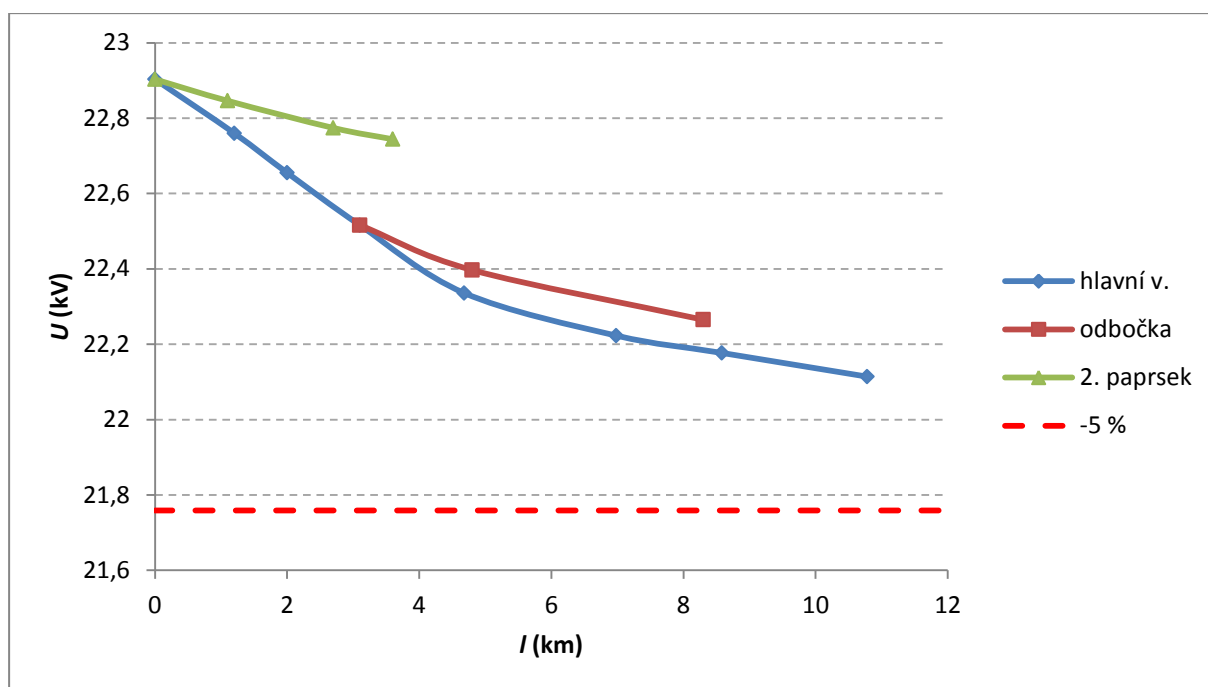
Tab. 2.4: Vypočtené hodnoty napětí pro určení limitního výkonu zdroje

<i>Jméno</i>	<i>Typ uzlu</i>	U_1 (kV)	U_2 (kV)	$\Delta U_{\%21}$ (%)
NP_110	Napájecí	115,5	115,5	0
PP_22	Pomocný	22,903	22,907	0,017
Odb_1	Odběrový	22,760	22,791	0,136
Odb_2	Odběrový	22,655	22,712	0,252
PU_1	Pomocný	22,516	22,616	0,444
Odb_3	Odběrový	22,397	22,497	0,446
Odb_4	Odběrový	22,265	22,366	0,454
Odb_5	Odběrový	22,336	22,535	0,891
Odb_6	Odběrový	22,223	22,564	1,534
PU_2	Pomocný	22,177	22,617	1,984
Odb_7	Odběrový	22,114	22,556	1,999
Odb_8	Odběrový	22,846	22,849	0,013
Odb_9	Odběrový	22,774	22,778	0,018
Odb_10	Odběrový	22,744	22,748	0,018

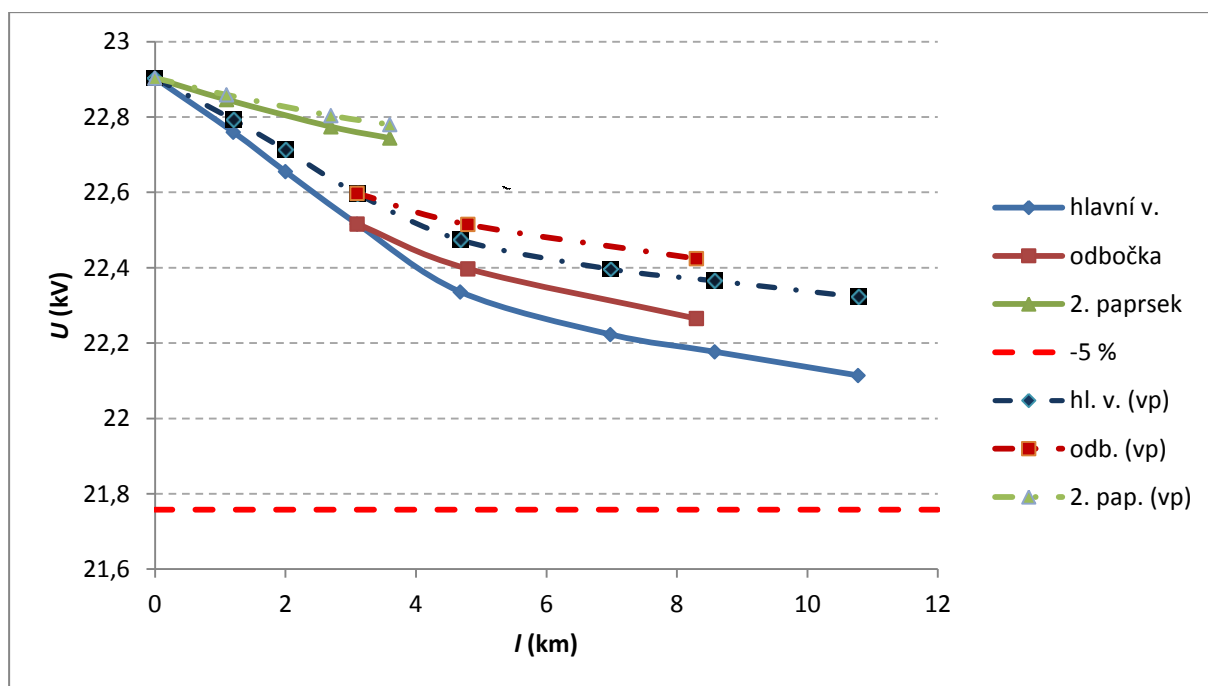
$$\Delta U_{\%21} = \frac{U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100 \% = \frac{22,556 - 22,114}{22,114} \cdot 100 \% = 1,999 \% \quad (2.3)$$

Čili postupnými změnami v dialogu generátoru byl stanoven maximální limitní činný výkon generátoru na 1 138 kW.

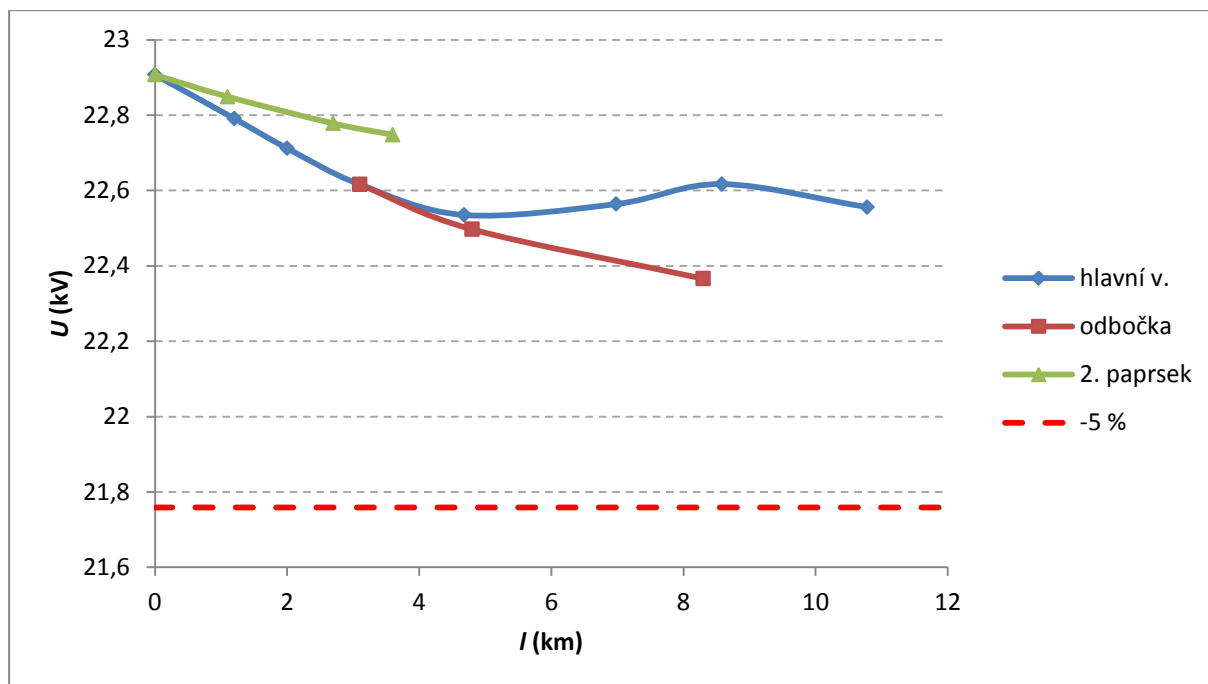
Ke zkonstruování grafické závislosti rozložení napětí $U = f(I)$ v síti (v tabulkovém procesoru Microsoft Office Excel) je vhodné zvolit úsek hlavního (kmenového) vedení mající největší úbytek napětí, resp. největší proudový moment a případné odbočky poté vykreslit ve vzdálenosti, kde dochází u dané odbočky k větvení (T-odbočka). Analogickým způsobem se poté vykreslí i druhý paprsek. Jako výchozí bod s nulovou délkou se uvažuje přípojnice na sekundární straně napájecího transformátoru. Vychází se z výsledků ustáleného chodu sítě vypočtených v bodě B (sloupce U_1 a U_2).



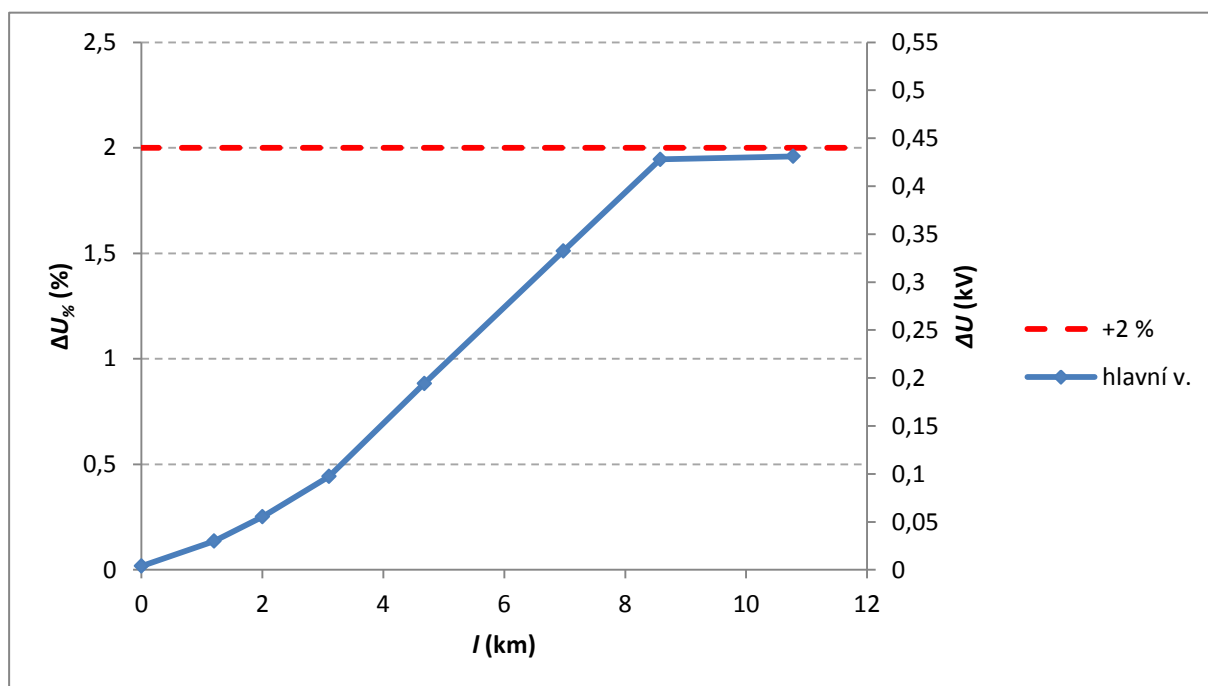
Obr. 2.19: Grafické rozložení napětí v celé síti bez zdroje



Obr. 2.20: Grafické rozložení napětí po zvětšení průřezu u každého vedení o 1 stupeň dle normalizované řady (vp – vyšší průřez)



Obr. 2.21: Grafické rozložení napětí v celé síti se zdrojem



Obr. 2.22: Grafická závislost rozložení změny napětí na kmenovém vedení

Z grafické závislosti rozložení napětí v síti bez zdroje je zřejmé postupné snižování velikosti napětí v daném odběru s rostoucí vzdáleností od přípojnice napájecího transformátoru, zatímco v síti se zdrojem je pokles napětí výrazně nižší. Pro názornost je na obr. 2.20 zobrazeno rozložení napětí v síti v případě zvětšení průřezu všech vedení o 1 stupeň dle normalizované řady, kdy je úbytek napětí sice nižší, ovšem je nutné počítat s vyššími investičními náklady. Z grafické závislosti změny napětí je patrné, že k největším změnám velikosti napětí dochází v místě připojení generátoru, především pak v odběrovém uzlu č. 7 a s rostoucí vzdáleností od tohoto uzlu je změna napětí čím dál menší.

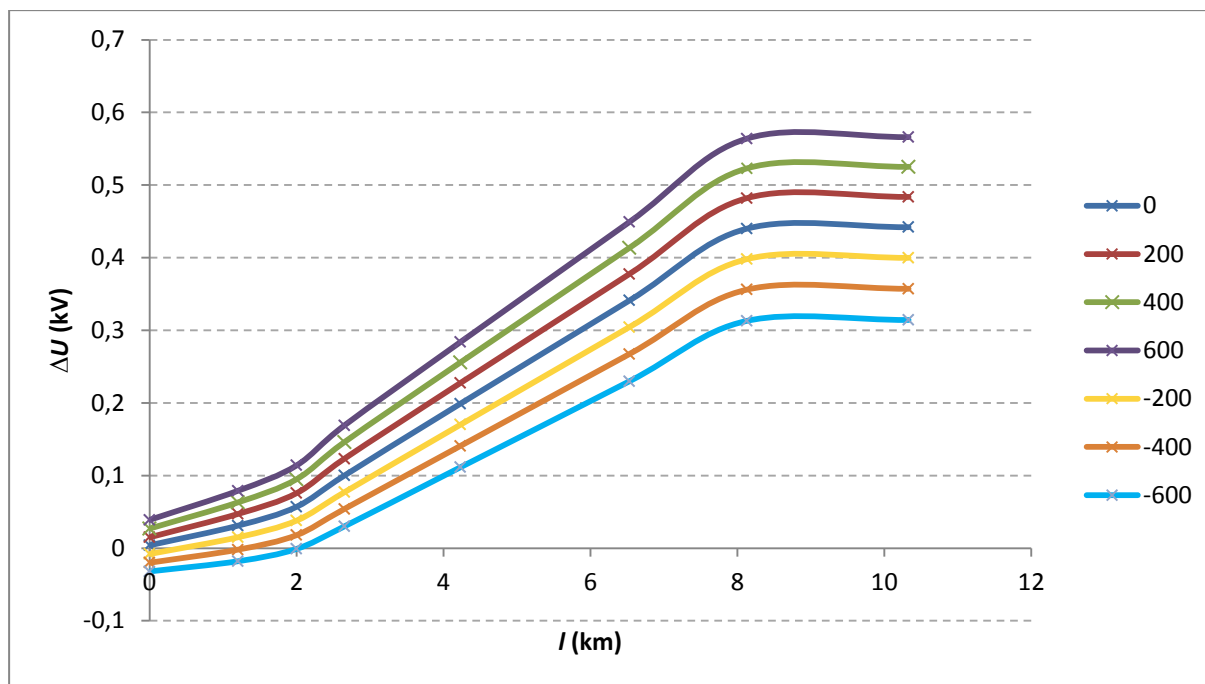
Pro zjištěnou hodnotu maximálního činného výkonu v bodě B (1 138 kW) se v následujícím úkolu bude měnit jeho dodávaný či odebíraný jalový výkon (mění se účinník). Změna velikosti jalového výkonu se provede v dialogu generátoru v části provozní parametry (obr. 2.15). Poté se opět provede výpočet ustáleného chodu sítě pro každý zvolený jalový výkon generátoru (tab. 2.5), získané hodnoty velikostí napětí v daných uzlech se poté odečtou od velikostí napětí v uzlech pro stav bez zdroje (tab. 2.6). K největším změnám velikosti napětí dochází na kmenovém vedení, proto je graficky vykreslen pouze tento úsek.

Tab. 2.5: Vypočtené hodnoty napětí v uzlech dle zvoleného jalového výkonu

Uzel	Délka l (km)	U (kV)							
		Bez zdroje	Q (kvar)						
			0	200	400	600	-200	-400	-600
PP_22	0	22,903	22,907	22,918	22,93	22,942	22,895	22,883	22,871
Odb_1	1,2	22,76	22,791	22,807	22,823	22,839	22,775	22,758	22,742
Odb_2	2	22,655	22,712	22,731	22,75	22,769	22,693	22,673	22,654
PU_1	3,1	22,516	22,616	22,639	22,662	22,685	22,593	22,57	22,546
Odb_3	4,8	22,397	22,497	22,521	22,544	22,567	22,474	22,451	22,427
Odb_4	8,3	22,265	22,366	22,390	22,413	22,436	22,343	22,319	22,295
Odb_5	4,68	22,336	22,535	22,564	22,592	22,620	22,506	22,477	22,447
Odb_6	6,98	22,223	22,564	22,601	22,637	22,672	22,527	22,490	22,453
PU_2	8,58	22,177	22,617	22,659	22,7	22,741	22,575	22,533	22,49
Odb_7	10,78	22,114	22,556	22,598	22,639	22,680	22,514	22,471	22,428
Odb_8	1,1	22,846	22,849	22,861	22,873	22,885	22,837	22,825	22,813
Odb_9	2,7	22,774	22,778	22,790	22,802	22,814	22,766	22,754	22,742
Odb_10	3,6	22,744	22,748	22,76	22,772	22,783	22,736	22,724	22,712

Tab. 2.6: Vypočtené rozdíly napětí

Uzel	Délka l (km)	ΔU (kV)						
		Q (kvar)						
		0	200	400	600	-200	-400	-600
PP_22	0	0,004	0,015	0,027	0,039	-0,008	-0,02	-0,032
Odb_1	1,2	0,031	0,0471	0,063	0,079	0,015	-0,002	-0,018
Odb_2	2	0,057	0,0758	0,095	0,114	0,038	0,018	-0,001
PU_1	3,1	0,1	0,1232	0,146	0,169	0,077	0,054	0,03
Odb_3	4,8	0,1	0,1238	0,1468	0,1696	0,0773	0,0537	0,0299
Odb_4	8,3	0,101	0,1247	0,1478	0,1707	0,0778	0,0541	0,0302
Odb_5	4,68	0,199	0,2275	0,2558	0,2838	0,17	0,1408	0,1114
Odb_6	6,98	0,341	0,3775	0,4135	0,4491	0,3044	0,2673	0,2298
PU_2	8,58	0,44	0,482	0,523	0,564	0,398	0,356	0,313
Odb_7	10,78	0,442	0,4837	0,5251	0,566	0,3998	0,3572	0,3142
Odb_8	1,1	0,003	0,015	0,0268	0,0386	-0,0088	-0,0208	-0,0328
Odb_9	2,7	0,004	0,016	0,0279	0,0397	-0,0079	-0,0199	-0,032
Odb_10	3,6	0,004	0,016	0,028	0,039	-0,008	-0,02	-0,032



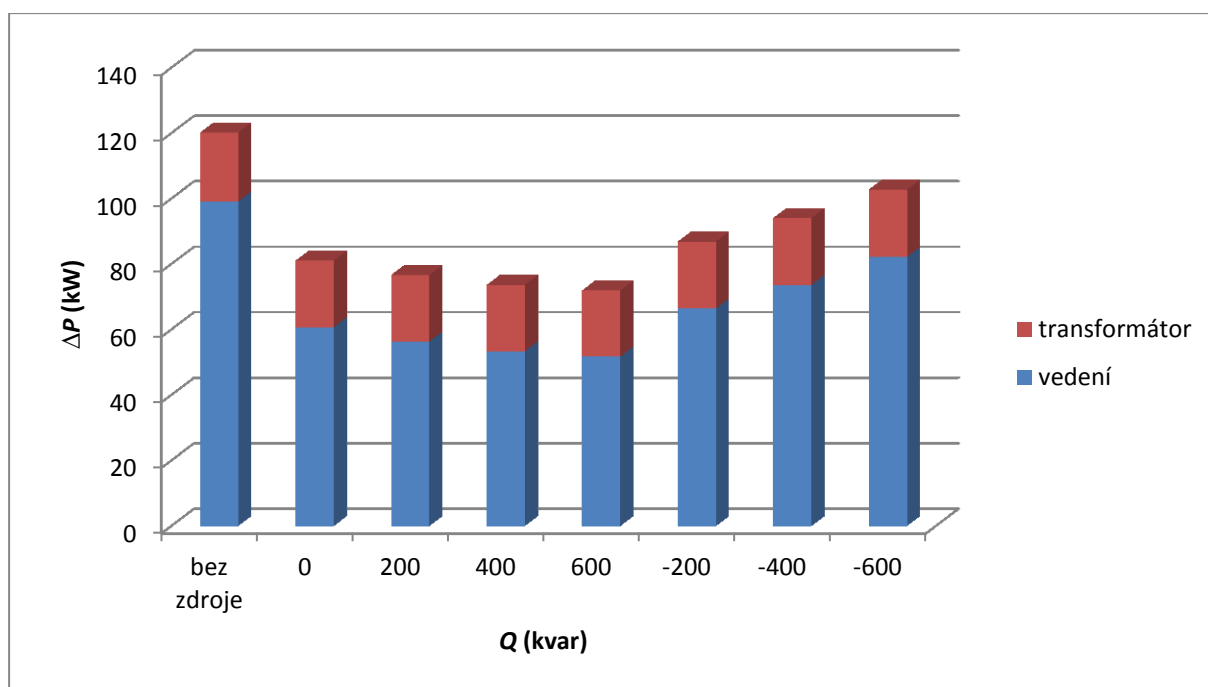
Obr. 2.23: Grafická závislost změny napětí na vzdálenosti způsobená změnou jalového výkonu (kladné hodnoty – dodávka, záporné hodnoty – odběr)

Z grafické závislosti je patrné, že dodává-li generátor jalový výkon do sítě, tedy má induktivní charakter, tak dochází k výrazné změně velikosti napětí, zatímco v případě odběru jalového výkonu, kdy má generátor kapacitní charakter, tak je změna velikosti napětí menší a rovněž vznikají v síti vyšší úbytky napětí.

Velikosti činných ztrát na vedeních, resp. na transformátoru jsou k dispozici v textovém výpisu výsledků ustáleného chodu sítě v části „Výsledné hodnoty – Vedení (ztráty na vedení)“ a „Výsledné hodnoty – Trafa (ztráty trafo)“. Případně celkové ztráty v části „Celková bilance a zatížení“. Výsledky jsou samozřejmě k dispozici i v liště pomůcek po kliknutí na ikonu „Otevřít tabulku“, v níž se vybere tabulka pro úseky vedení, a poté se v pravém sloupci zaškrtnou činné ztráty, které budou určovat velikosti činných ztrát pro každý úsek vedení, pokud nás zajímá velikost celkových činných ztrát na vedení, tak je potřeba kliknout na sloupec s činnými ztrátami a poté v horní liště zaškrtnout „Zobrazit sumár. hodnoty“, objeví se tabulka, v níž je součet veškerých činných ztrát na vedení.

Tab. 2.7: Vypočtené hodnoty činných ztrát dle změny jalového výkonu

Typ prvku	ΔP (kW)							
	Bez zdroje	Q (kvar)						
		0	200	400	600	-200	-400	-600
Vedení	99,116	60,675	56,318	53,34	51,727	66,427	73,592	82,184
Transformátor	21,011	20,35	20,294	20,243	20,197	20,411	20,477	20,549
Celkové	120,127	81,025	76,612	73,583	71,924	86,838	94,069	102,733



Obr. 2.24: Sloupcový graf vyjadřující celkové ztráty v závislosti na změně jalového výkonu zdroje

Sloupcový graf znázorňuje podíl ztrát ve vedeních a transformátoru a je zřejmé, že se zvyšující se dodávkou jalového výkonu (induktivní charakter) budou ztráty klesat, zatímco v případě odběru jalového výkonu (kapacitní charakter) budou ztráty narůstat, nejvyšší ztráty jsou v síti tehdy, pokud potřebný výkon dodává pouze transformátor.

Následující úkol E je analogický jako předcházející, ovšem s tím rozdílem, že se zde mění v dialogu generátoru v části provozní parametry velikost pouze činného výkonu (účinník je roven 1). Poté se provádí výpočet ustáleného chodu sítě (s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením) pro sedm různých hodnot činného výkonu zdroje od 0 do jeho limitní hodnoty (1 138 kW), přičemž nás zajímá změna velikosti napětí v jednotlivých uzlech sítě. Součástí úkolu je také vykreslení sloupcového grafu závislosti celkových činných ztrát sítě ΔP na instalovaném činném výkonu zdroje, tyto data lze získat stejným způsobem jako v předchozím úkolu.

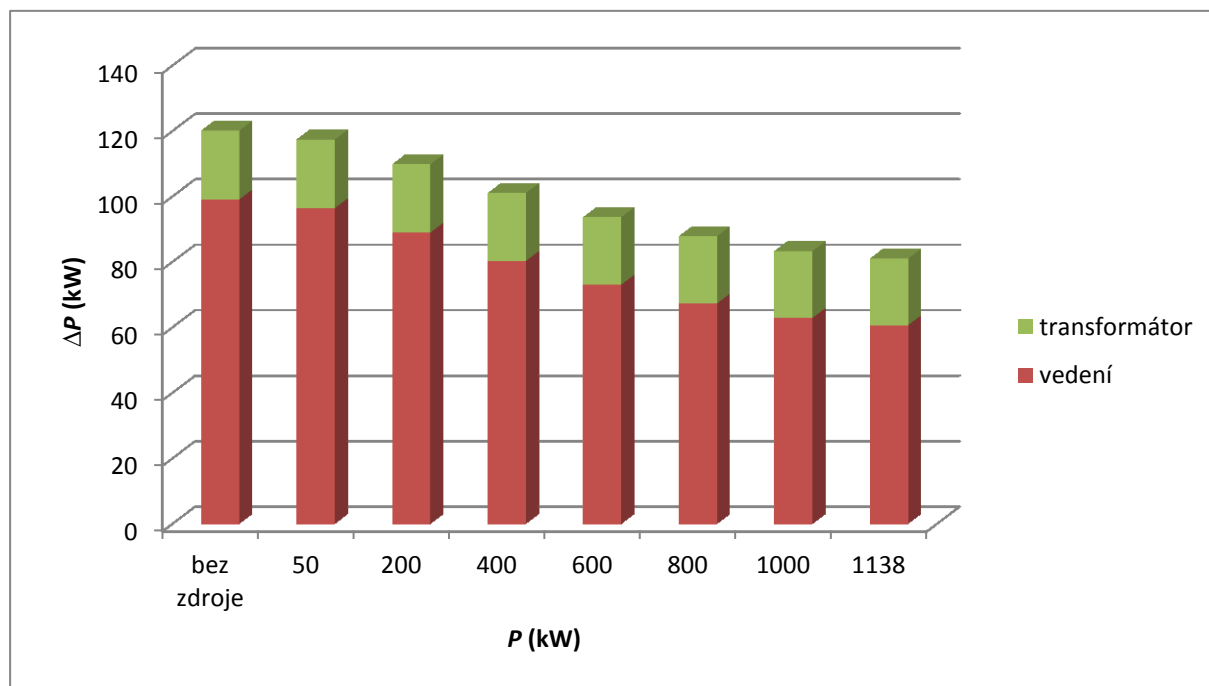
Tab. 2.8: Vypočtené hodnoty napětí v uzlech dle zvoleného činného výkonu

Uzel	Délka l (km)	U (kV)							
		Bez zdroje	P (kW)						
			50	200	400	600	800	1 000	1 138
PP_22	0	22,903	22,903	22,904	22,904	22,905	22,906	22,906	22,907
Odb_1	1,2	22,76	22,762	22,766	22,771	22,777	22,782	22,787	22,791
Odb_2	2	22,655	22,658	22,666	22,676	22,686	22,695	22,705	22,712
PU_1	3,1	22,516	22,52	22,534	22,334	22,569	22,587	22,604	22,616
Odb_3	4,8	22,397	22,401	22,415	22,433	22,451	22,468	22,486	22,498
Odb_4	8,3	22,265	22,269	22,283	22,301	22,319	22,337	22,354	22,366
Odb_5	4,68	22,336	22,345	22,371	22,407	22,442	22,477	22,511	22,535
Odb_6	6,98	22,223	22,238	22,284	22,344	22,405	22,464	22,524	22,564
PU_2	8,58	22,177	22,197	22,256	22,334	22,412	22,489	22,565	22,617
Odb_7	10,78	22,114	22,134	22,194	22,272	22,350	22,427	22,504	22,556

Odb_8	1,1	22,846	22,846	22,846	22,847	22,848	22,848	22,849	22,849
Odb_9	2,7	22,774	22,775	22,775	22,776	22,777	22,777	22,778	22,778
Odb_10	3,6	22,744	22,744	22,745	22,746	22,746	22,747	22,747	22,748

Tab. 2.9: Vypočtené hodnoty činných ztrát dle změny činného výkonu

Typ prvku	ΔP (kW)							
	Bez zdroje	P (kW)						
		50	200	400	600	800	1 000	1 138
Vedení	99,116	96,437	88,965	80,3	73,088	67,301	62,908	60,675
Transformátor	21,011	20,979	20,883	20,76	20,642	20,529	20,421	20,35
Celkové	120,127	117,416	109,848	101,06	93,73	87,83	83,329	81,025



Obr. 2.25: Sloupkový graf vyjadřující celkové ztráty v závislosti na změně činného výkonu zdroje

Z vypočtených hodnot činných ztrát a sloupkového grafu je zřejmé, že pokud bude síť napájena pouze transformátorem, budou v síti nejvyšší činné ztráty, a to 120,127 kW, neboť veškerý výkon potřebný pro danou síť dodává pouze napájecí transformátor. Největší proudy tedy tečou vedením napojeným na tento transformátor a způsobují nejvyšší činné ztráty. Připojením generátoru již transformátor dodává výkon snížený o dodávku výkonu připojeného generátoru, dojde také k odlehčení zatížení určitých vedení, především pak vedení napojených na transformátor. S rostoucím dodávaným činným výkonem připojeného zdroje klesá dodávaný výkon transformátoru, snižují se především ztráty na vedeních a při limitním výkonu 1 138 kW, jsou celkové činné ztráty 81,025 kW.

V bodě F se požaduje výpočet ustáleného chodu sítě s připojeným zdrojem a záložním vedením, čili je nutné ve výpočetním editoru provést připojení záložního vedení a dále odpojení jednoho (a poté i druhého) paprsku na přípojnici 22 kV napájecího transformátoru, což se provádí analogicky jako v bodě A (viz obr. 2.18). Následuje výpočet ustáleného chodu sítě pro

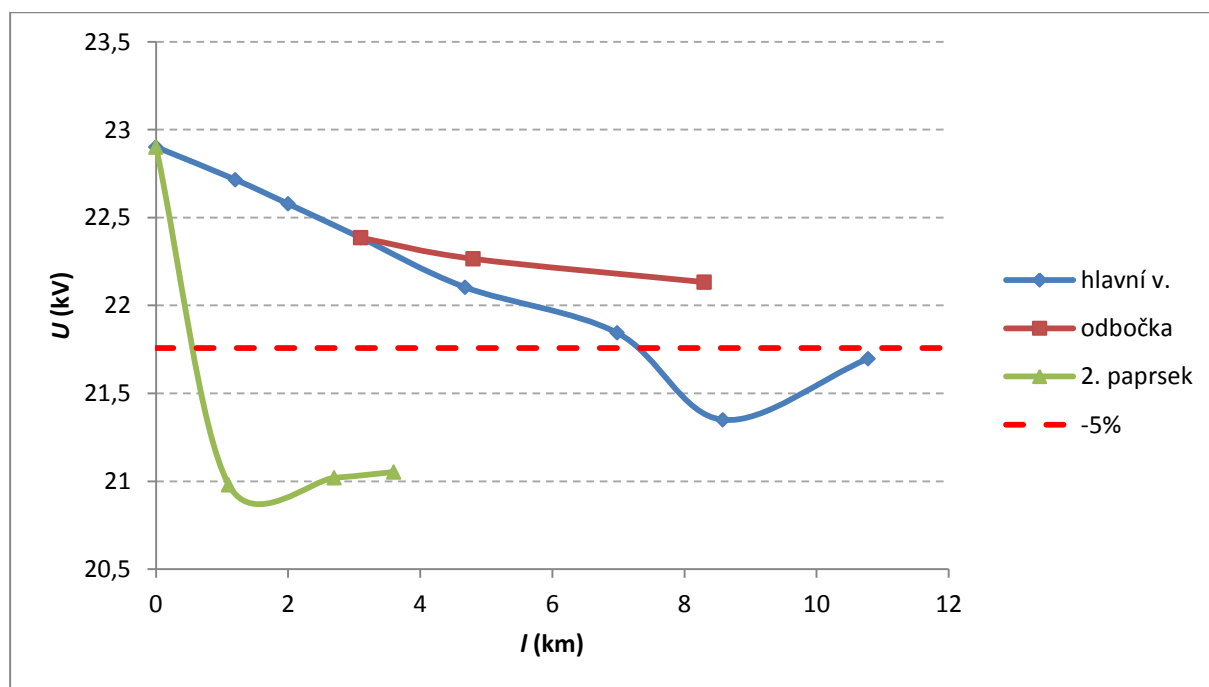
tyto dvě náhradní konfigurace. Přehledné výsledky lze zobrazit opět přes tabulku, v níž se pro úseky vedení a transformátor zaškrtnou z nabízených možností pravého sloupce „Relativní proud“, pro fyzické uzly se zaškrtnou „E uzlu“, jež určuje velikost napětí v daném uzlu.

V namodelovaném schématu došlo postupně k odpojení vedení Ved_1 a Ved_10, vypočtené hodnoty velikostí napětí v jednotlivých uzlech a velikosti procentního zatížení jednotlivých úseků vedení a transformátoru jsou v následující tabulce. Červeně jsou vyznačeny ty hodnoty velikostí napětí, u nichž došlo k překročení 5 % z napětí na začátku paprsku (uzel PP_22).

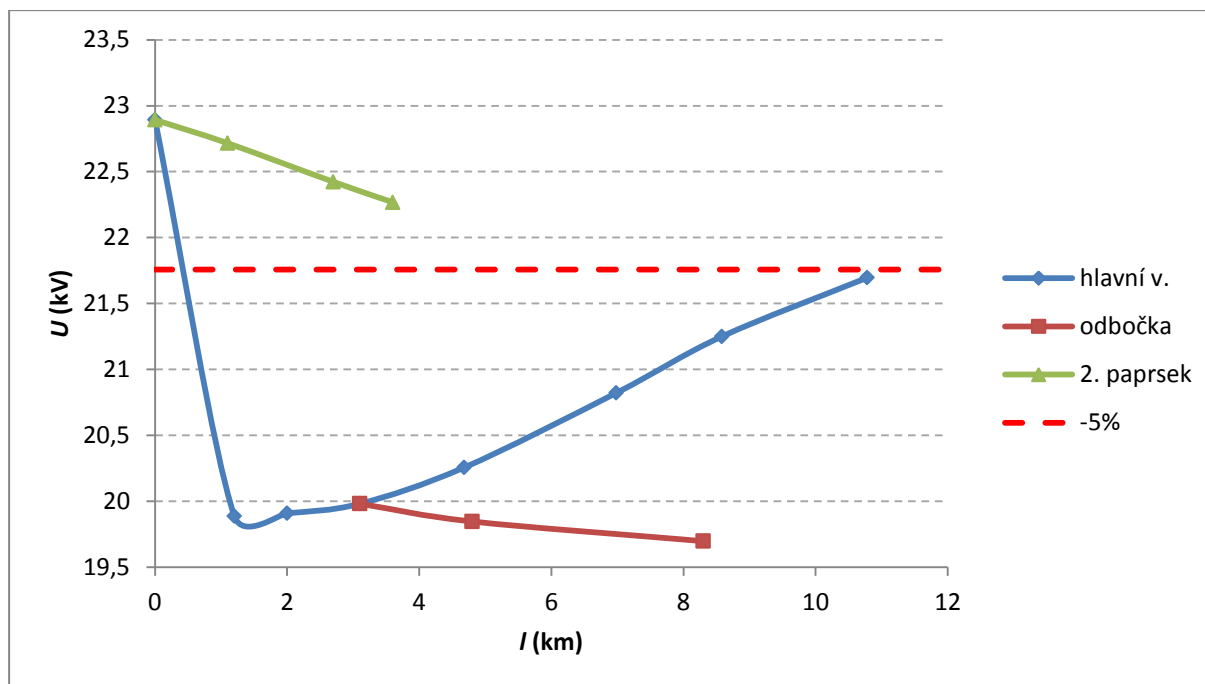
Tab. 2.10: Vypočtené hodnoty velikostí napětí v uzlech sítě a procentního zatížení úseků vedení a transformátoru

Uzel	U_{VI} (kV)	U_{VI0} (kV)
PP_22	22,901	22,893
Odb_1	22,716	19,889
Odb_2	22,578	19,91
PU_1	22,385	19,982
Odb_3	22,265	19,847
Odb_4	22,133	19,698
Odb_5	22,104	20,257
Odb_6	21,844	20,822
PU_2	21,35	21,25
Odb_7	21,698	21,696
Odb_8	20,980	22,716
Odb_9	21,020	22,423
Odb_10	21,053	22,268

Vedení	I_{rel_VI} (%)	I_{rel_VI0} (%)
Ved_1	0	69
Ved_2	12	77
Ved_3	29	78
Ved_4	29	25
Ved_5	15	14
Ved_6	63	66
Ved_7	88	43
Ved_8	96	36
Ved_9	75	56
Ved_10	72	0
Ved_11	82	11
Ved_12	77	16
Ved_Z_13	73	39
Transformátor	16	15



Obr. 2.26: Grafická závislost rozložení napětí v síti při odpojení úseku vedení Ved_1



Obr. 2.27: Grafická závislost rozložení napětí v síti při odpojení úseku Ved_10

Z tabulky i grafických závislostí je zřejmé výrazné překročení dovoleného úbytku napětí v určitých zvýrazněných uzlech, odpojení paprsku na vývodu z přípojnice 22 kV napájecího transformátoru odpovídá nejhoršímu provoznímu stavu, kdy je určitá porucha na začátku paprsku.

Poslední úkol představuje ekonomické zhodnocení dané sítě pomocí metody čisté současné hodnoty – NPV, při které se vychází z investičních nákladů instalovaných zařízení, dále z celkových činných ztrát, celkového zatížení a limitního výkonu generátoru zjištěného v rámci úkolu B.

Na základě poskytnutého MS Excel souboru *Ekonomie_hodnoceni_20xx* se spočítají celkové investiční náklady pro jednotlivé odpisové skupiny (tab. 2.11 a 2.12), tyto náklady se poté zapíší do zvýrazněných buněk souboru Excel na listu *NPV – 2*.

Tab. 2.11: Investiční náklady pro transformovnu 110/22 kV

Položka	Odpisová skupina	Investiční náklady [tis. Kč]
1. Stanoviště transformátoru 2x	5	3000
2. Budova	5	5000
3. Stanoviště zhášecí tlumivky 2x	5	500
4. TR 110/22 KV, 40 MVA (2x - jeden záložní)	3	15000
5. Pole přívodní 2x	3	6500
6. Pole přívodu k transformátoru 2x	3	5500
7. Pole spojky 1x	3	400
8. Ochrana a měření vvn	1	3000
9. Ochrana a měření vn, řídicí systém	1	5000
10. Ostatní (ovl. skřín TR, kabeláž,	3	4000

přípojnice)		
11. Skříňový rozvaděč vn 3x	3	1500
12. Zhášecí tlumivka 2x	3	650
13. Zařízení pro vlastní spotřebu	3	4000

Tab. 2.12: Investiční náklady pro vedení 22 kV (ceny za 1 km trojžilového vedení)

Položka	Odpisová skupina	Investiční náklady [tis. Kč]
14. průřez 70 mm ² (2,3 km)	4	660
15. průřez 50 mm ² (3,3 km)	4	620
16. průřez 35 mm ² (4,6 km)	4	570
17. průřez 25 mm ² (12,88 km)	4	540

Investiční náklady – 1. odpisová skupina (N_{i1}):

$$N_{i1} = 3000 \cdot 10^3 + 5000 \cdot 10^3 = 8 \text{ mil. Kč}$$

Investiční náklady – 3. odpisová skupina (N_{i3}):

$$N_{i3} = 15000 \cdot 10^3 + 6500 \cdot 10^3 + 5500 \cdot 10^3 + 400 \cdot 10^3 + 4000 \cdot 10^3 + 1500 \cdot 10^3 + 650 \cdot 10^3 + 4000 \cdot 10^3$$

$$= 37,55 \text{ mil. Kč}$$

Investiční náklady – 4. odpisová skupina (N_{i4}):

$$N_{i4} = 660 \cdot 10^3 \cdot 2,3 + 620 \cdot 10^3 \cdot 3,3 + 570 \cdot 10^3 \cdot 4,6 + 540 \cdot 10^3 \cdot 12,88 = 13,1412 \text{ mil. Kč}$$

Investiční náklady – 5. odpisová skupina (N_{i5}):

$$N_{i5} = 3000 \cdot 10^3 + 5000 \cdot 10^3 + 500 \cdot 10^3 = 8,5 \text{ mil. Kč}$$

Celkové investiční náklady transformovny a vedení (N_{ic}):

$$N_{ic} = N_{i1} + N_{i3} + N_{i4} + N_{i5} = 8 + 37,55 + 13,1412 + 8,5 = 67,1912 \text{ mil. Kč}$$

Dále je potřeba do dalších buněk zapsat velikost celkových činných ztrát pro základní konfiguraci sítě tj. 0,081 MW, velikost celkového zatížení 6,15 MW a velikost limitního výkonu generátoru (1,14 MW).

Pro účely projektu se vychází z předpokladu, že provozovatel navrhované VN sítě není vlastníkem připojeného zdroje a jeho tržby za dodanou elektrickou energii odběratelům jsou sníženy o výkup elektrické energie, kterou tento zdroj do sítě dodává. Typickým zdrojem je právě kogenerační jednotka v rámci zemědělských bioplynových stanic, která využívá vyrobenou elektřinu na pokrytí vlastní spotřeby, přičemž větší část vyrobené elektrické energie je prodávána do distribuční sítě. Pro potřeby projektu se ovšem uvažuje s prodejem veškeré vyrobené elektrické energie, kdy kogenerační jednotka je v provozu nepřetržitě s 6 h údržbovými výpadky každý měsíc, což znamená provoz 8 688 h/rok, výkupní cena za 1 MWh je stanovena na 1 000 Kč.

Dále se předpokládá doba výstavby celé sítě na 2 roky (2020 a 2021), přičemž investiční náklady jsou rovnoměrně rozloženy po celou dobu výstavby, síť je uvedena do provozu v roce 2022. Celková doba posuzování efektivnosti investic je stanovena na 20 let.

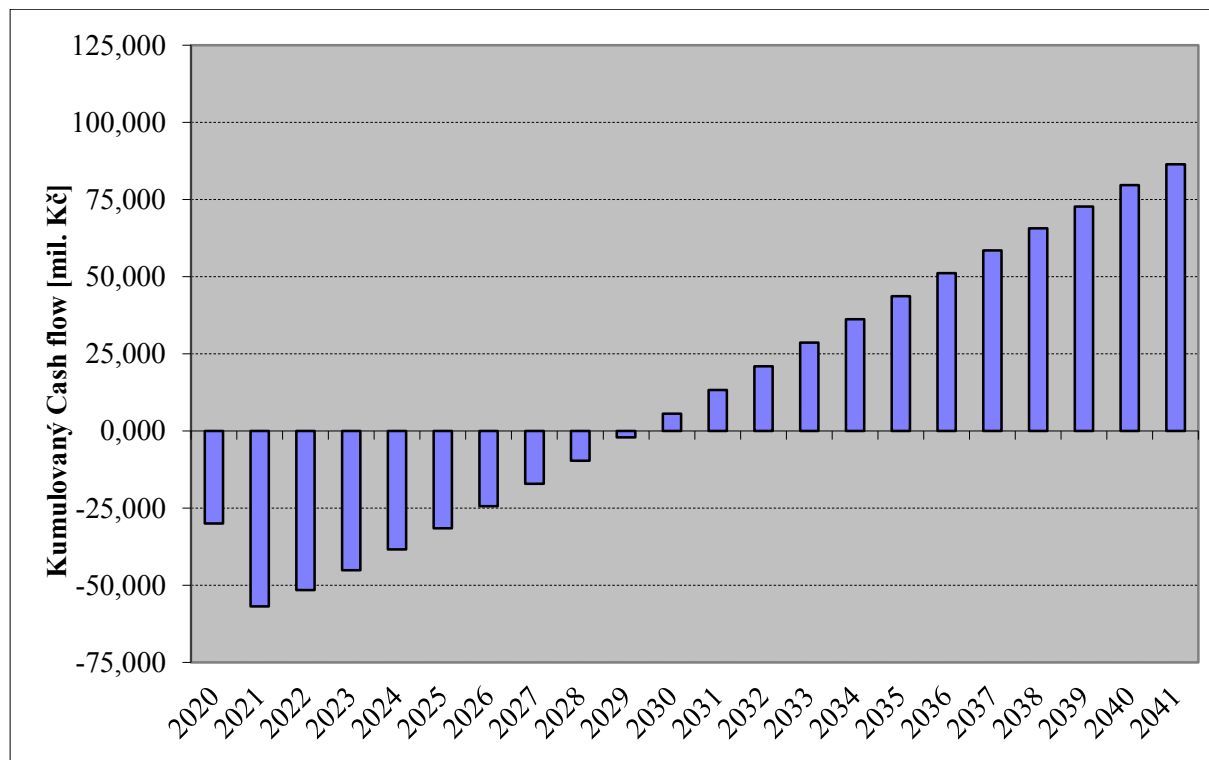
Tab. 2.13: Předpokládané ekonomické údaje

Trend růstu zatížení	1,015	-
Trend růstu odbytové ceny elektrické energie	1,05	-
Trend růstu ceny za výkup elektrické energie	1,02	-
Odbytová cena elektrické energie v roce 2020	1650	Kč/MWh
Trend růstu ceny opatřené elektrické energie	1,01	-
Cena opatřené elektrické energie v roce 2020	1050	Kč/MWh
Náklady na provoz, opravy a údržbu	0,8	%
Trend růstu náklady na provoz, opravy a údržbu	1,085	-
Diskontní sazba	12	%
Daň z příjmu	19	%

Doba využití maxima: 5 000 h

Doba plných ztrát: 3 283 h

Výsledkem ekonomické efektivnosti je celkový kumulovaný cash flow (peněžní tok), tedy suma peněžních příjmů v rozmezí sledovaných 20 let. Z grafu je patrné, že v prvních 8 letech od zprovoznění sítě (2022) dochází především ke splácení vynaložených investic a až poté (od roku 2030) již vznikají peněžní zisky, v roce 2041 je velikost čisté současné hodnoty 86,474 mil. Kč. Tabulka 2.14 poskytuje přehled ekonomické efektivnosti v jednotlivých letech, informaci o peněžním toku udává poslední sloupec tabulky.



Obr. 2.28: Graf zobrazující kumulovaný cash flow

Tab. 2.14: Výsledná tabulka ekonomické efektivity metodou NPV

období	zatížení	odebraná energie	odbytová cena energie	tržby	náklady na výkup EE ze zdroje	celkové tržby	nákladní cena energie	náklady na opatř. energie	provoz, opravy a údržba	ztráty elektr. energie	náklady na ztráty	odpisy					provozní náklady celkem	základ daně	daň z příjmu	hospod. výsl. po zdanění	provozní cash flow	invest. náklady	cash flow	diskontní faktor	aktual. cash flow	kumul. cash flow
[rok]	[MW]	[MWh]	[Kč/MWh]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[Kč/MWh]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[MWh]	[mil. Kč]	1. odpis. skupina	3. odpis. skupina	4. odpis. skupina	5. odpis. skupina	celkem	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[-]	[mil. Kč]	[mil. Kč]
2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	-33,596	0,893	-29,996	-29,996
2021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	-33,596	0,797	-26,782	-56,778
2022	6,150	30750	1650	50,738	9,904	40,833	1050	32,288	0,538	266	0,279	2,000	3,128	0,657	0,283	6,068	39,172	1,661	0,316	1,345	7,413	0	7,413	0,712	5,277	-51,502
2023	6,242	31211	1733	54,073	10,102	43,971	1061	33,100	0,583	270	0,286	3,000	5,738	1,248	0,547	10,533	44,503	-0,531	-0,101	-0,430	10,103	0	10,103	0,636	6,421	-45,081
2024	6,336	31679	1819	57,629	10,304	47,324	1071	33,932	0,633	274	0,294	2,000	5,216	1,183	0,529	8,927	43,785	3,539	0,672	2,867	11,794	0	11,794	0,567	6,692	-38,389
2025	6,431	32155	1910	61,418	10,511	50,907	1082	34,785	0,687	278	0,301	1,000	4,694	1,117	0,510	7,321	43,094	7,814	1,485	6,329	13,650	0	13,650	0,507	6,915	-31,474
2026	6,527	32637	2006	65,456	10,721	54,735	1093	35,660	0,745	282	0,308	0,000	4,172	1,051	0,491	5,714	42,428	12,307	2,338	9,969	15,683	0	15,683	0,452	7,094	-24,379
2027	6,625	33126	2106	69,760	10,935	58,825	1104	36,557	0,808	287	0,316	0,000	3,650	0,986	0,473	5,108	42,790	16,035	3,047	12,988	18,096	0	18,096	0,404	7,309	-17,070
2028	6,725	33623	2211	74,347	11,154	63,193	1115	37,476	0,877	291	0,324	0,000	3,128	0,920	0,453	4,501	43,179	20,014	3,803	16,212	20,712	0	20,712	0,361	7,469	-9,601
2029	6,826	34128	2322	79,235	11,377	67,858	1126	38,419	0,952	295	0,332	0,000	2,606	0,854	0,434	3,894	43,597	24,261	4,610	19,651	23,546	0	23,546	0,322	7,581	-2,020
2030	6,928	34640	2438	84,445	11,604	72,840	1137	39,385	1,032	300	0,341	0,000	2,088	0,788	0,416	3,292	44,050	28,790	5,470	23,320	26,612	0	26,612	0,287	7,650	5,630
2031	7,032	35159	2560	89,997	11,837	78,160	1148	40,376	1,120	304	0,349	0,000	1,566	0,723	0,397	2,686	44,531	33,629	6,390	27,240	29,925	0	29,925	0,257	7,681	13,311
2032	7,137	35687	2688	95,914	12,073	83,841	1160	41,391	1,215	309	0,358	0,000	1,044	0,657	0,377	2,078	45,043	38,798	7,372	31,426	33,505	0	33,505	0,229	7,678	20,989
2033	7,244	36222	2822	102,220	12,315	89,906	1171	42,432	1,319	313	0,367	0,000	0,522	0,591	0,359	1,472	45,590	44,316	8,420	35,896	37,368	0	37,368	0,205	7,646	28,636
2034	7,353	36765	2963	108,941	12,561	96,380	1183	43,499	1,431	318	0,376	0,000	0,000	0,526	0,340	0,866	46,172	50,208	9,540	40,669	41,534	0	41,534	0,183	7,588	36,224
2035	7,463	37317	3111	116,104	12,812	103,292	1195	44,593	1,552	323	0,386	0,000	0,000	0,460	0,321	0,781	47,313	55,979	10,636	45,343	46,124	0	46,124	0,163	7,524	43,748
2036	7,575	37876	3267	123,738	13,069	110,670	1207	45,715	1,684	328	0,395	0,000	0,000	0,394	0,303	0,697	48,492	62,178	11,814	50,364	51,061	0	51,061	0,146	7,437	51,185
2037	7,689	38445	3430	131,874	13,330	118,544	1219	46,865	1,827	333	0,405	0,000	0,000	0,329	0,283	0,612	49,709	68,835	13,079	55,756	56,368	0	56,368	0,130	7,330	58,515
2038	7,804	39021	3602	140,545	13,597	126,948	1231	48,043	1,983	338	0,416	0,000	0,000	0,263	0,264	0,527	50,969	75,979	14,436	61,543	62,070	0	62,070	0,116	7,207	65,721
2039	7,921	39607	3782	149,786	13,868	135,917	1244	49,252	2,151	343	0,426	0,000	0,000	0,197	0,246	0,443	52,272	83,645	15,893	67,753	68,195	0	68,195	0,104	7,070	72,791
2040	8,040	40201	3971	159,634	14,146	145,488	1256	50,490	2,334	348	0,437	0,000	0,000	0,131	0,227	0,358	53,620	91,868	17,455	74,413	74,772	0	74,772	0,093	6,921	79,712
2041	8,161	40804	4169	170,130	14,429	155,701	1269	51,760	2,533	353	0,448	0,000	0,000	0,066	0,207	0,273	55,014	100,688	19,131	81,557	81,830	0	81,830	0,083	6,763	86,474

2.6. Výpočet ustáleného chodu sítě při napájení ze dvou stran

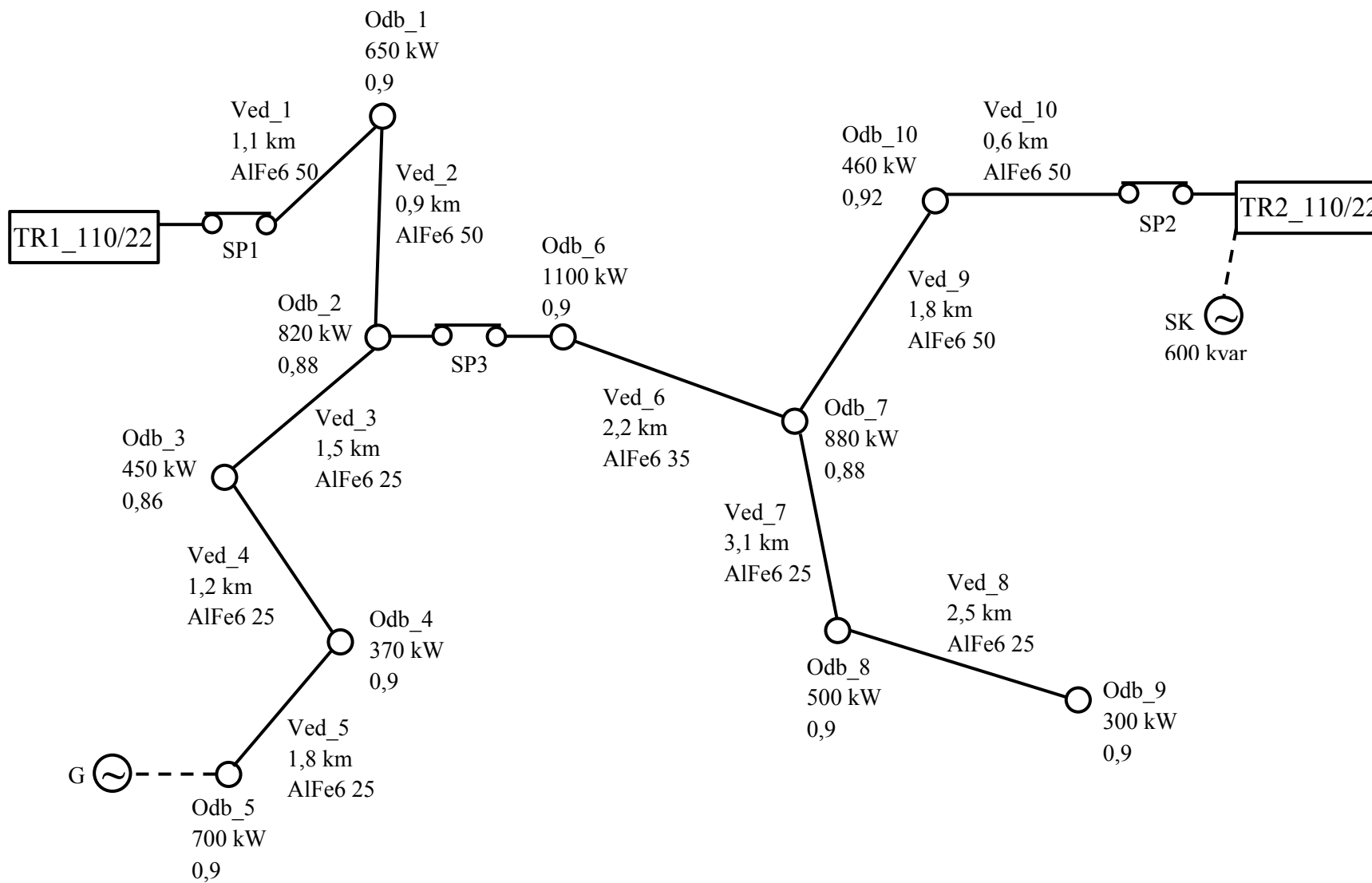
Demonstrační úloha sloužící především k osvojení si dovedností resp. vyzkoušení si práce v programu DAISY Bizon Projektant EDU.

Distribuční síť VN je koncipována jako jednopaprsková, je tvořena dvěma napájecími transformátory s převodem 110/22 kV umístěnými na okrajích sítě, přičemž u jednoho je připojen synchronní kompenzátor dodávající do sítě pouze jalovou energii (600 kvar), dále obsahuje 10 odběrných míst, která jsou určena odebíraným činným výkonem a účínkem, jednotlivá odběrná místa jsou navzájem propojena venkovními vedeními 22 kV AlFe6 s různým průřezem a délkou. Konkrétní odběr je také zadán na sekundární přípojnici 22 kV napájecích transformátorů, jež představuje součet odběrů na dalších, ovšem nevykreslených vývodech. Síť obsahuje také dvě T-odbočky, přičemž u jedné z nich je na jejím konci zdroj reprezentující synchronní generátor dodávající takový výkon, aby v žádném místě (před připojením zdroje) nebyla překročena změna napětí vyšší než 2 %. Změnu konfigurace sítě umožňují 3 spínače, přičemž dva jsou umístěny na vývodech z transformátorů, z přípojnice 22 kV, což tedy poskytuje odpojení jednoho transformátoru a napájení celé sítě transformátorem druhým a třetí spínač se nachází mezi dvěma odběrnými místy uprostřed paprsku, který tedy poskytuje v sepnutém stavu vzájemnou spolupráci obou transformátorů a tedy napájení ze dvou stran, případně v rozpojeném stavu provoz soustav odděleně.

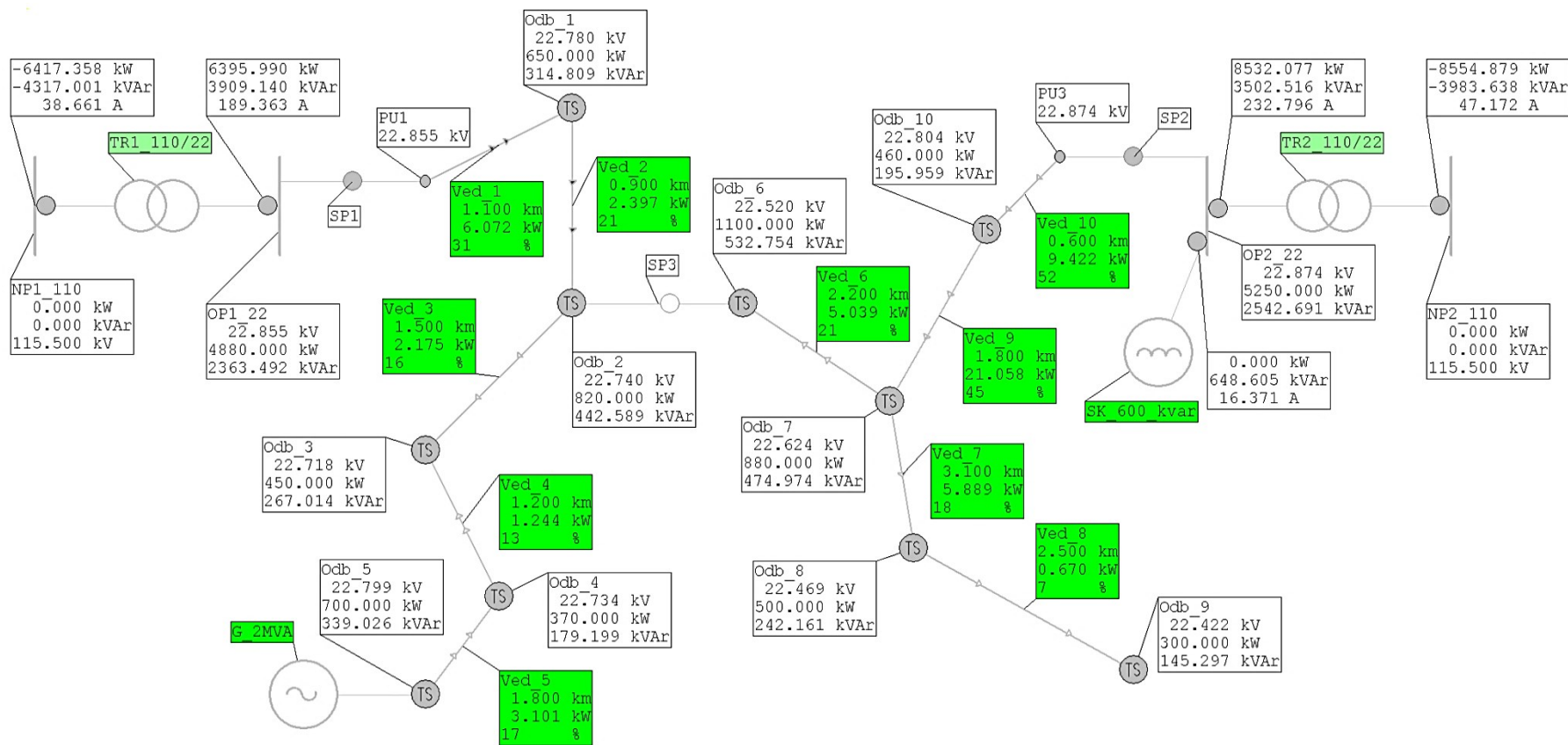
Před výpočtem ustáleného chodu sítě pro dané konfigurace je nutné se přesvědčit, že je aktivována ikona referenčního uzlu „Ref“ (v dolní liště pracovní plochy v režimu výpočtů). Při výpočtu ustáleného chodu sítě Newton-Raphsonovou iterační metodou existuje právě jeden referenční uzel, ve kterém se dopočítávají bilance jalového a činného výkonu. Obvykle je tento uzel určen jako připojení na nadřazenou síť, algoritmus výpočtu vybírá z uzlů v nejvyšší napěťové hladině právě ten, který má největší rozsah regulace jalového výkonu, což ideálně funguje s jedním napájecím místem, máme-li ovšem dvě a více napájecích míst, tak algoritmus vybere pouze jedno místo a ostatní místa se chovají jako standardní statické dodávky v činném výkonu a jako regulační generátor ve výkonu jalovém. A jelikož napájecí místa obvykle nemají zadaný žádný činný výkon, jeví se celá síť jakoby napájená jedním transformátorem, zatímco z druhého žádný činný výkon neteče. Referenční uzel pak slouží jako virtuální entita, která je se všemi napájecími místy virtuálně propojena pomocí větví s nulovou impedancí. Díky tomu se pak dopočtený výkon distribuuje do sítě všemi napájecími místy. Pro výpočet sítě 22 kV je referenčním uzlem obvykle primární přípojnice napájecího transformátoru 110/22 kV.

Výpočtem ustáleného chodu sítě pro základní konfiguraci, tzn. rozpojený spínač SP3, byl stanoven limitní činný výkon generátoru 1 489 kW.

Schéma sítě



Obr. 2.29: Schéma sítě při napájení ze dvou stran



Obr. 2.30: Namodelované schéma včetně výpočtu v základní konfiguraci

2.6.1. Vypočtené hodnoty ustáleného chodu sítě při sepnutí daných spínačů

Tab. 2.15: Vypočtené hodnoty napětí a dodávek činného a jalového výkonu pro fyzické uzly

				$SP1, SP2$	$SP1, SP3$	$SP2, SP3$	$SP1, SP2, SP3$
<i>Jméno</i>	<i>Typ uzlu</i>	P_{odb} (kW)	Q_{odb} (kvar)	U (kV)	U (kV)	U (kV)	U (kV)
NP1_110	Napájecí	0	0	115,5	115,5	115,5	115,5
Odb_OP1	Odběrový	4 880	2 363,492	22,851	22,75	22,948	22,844
Odb_1	Odběrový	650	314,809	22,731	22,545	22,050	22,739
Odb_2	Odběrový	820	442,589	22,654	22,398	22,071	22,674
Odb_3	Odběrový	450	267,014	22,511	22,375	22,048	22,651
Odb_4	Odběrový	370	179,199	22,430	22,392	22,065	22,668
Odb_5	Odběrový	700	339,026	22,352	22,458	22,132	22,733
NP2_110	Napájecí	0	0	115,5	115,5	115,5	115,5
Odb_OP2	Odběrový	5 250	2 542,691	22,874	22,975	22,775	22,885
Odb_6	Odběrový	1100	532,754	22,520	22,398	22,071	22,674
Odb_7	Odběrový	880	474,974	22,624	22,192	22,354	22,702
Odb_8	Odběrový	500	242,161	22,469	22,034	22,198	22,548
Odb_9	Odběrový	300	145,297	22,422	21,987	22,150	22,502
Odb_10	Odběrový	460	195,959	22,804	22,162	22,663	22,832
P_{dod_NP1} (kW)				6 417,358	9 751,307	4 900,86	7 349,267
P_{dod_NP2} (kW)				8 554,879	5 270,183	10 154,345	7 612,551
Q_{dod_NP1} (kvar)				4 317,358	6 134,034	2702,452	4 501,769
Q_{dod_NP2} (kvar)				3 983,638	2 231,477	5 696,292	3 786,457

Tab. 2.16: Vypočtené hodnoty ztrát a relativního proudu pro transformátory

		$SP1, SP2$		$SP1, SP3$		$SP2, SP3$		$SP1, SP2, SP3$	
<i>Jméno</i>		ΔP_T (kW)	I_{rel} (%)	ΔP_T (kW)	I_{rel} (%)	ΔP_T (kW)	I_{rel} (%)	ΔP_T (kW)	I_{rel} (%)
TR1_110/22		21,368	18	24,787	27	20,086	13	22,056	21
TR2_110/22		22,801	22	20,183	14	24,095	28	22,002	20

Tab. 2.17: Vypočtené hodnoty ztrát a relativního proudu pro vedení

			$SP1, SP2$		$SP1, SP3$		$SP2, SP3$		$SP1, SP2, SP3$	
<i>Jméno</i>	l (km)	S (cm ²)	ΔP_V (kW)	I_{rel} (%)	ΔP_V (kW)	I_{rel} (%)	ΔP_V (kW)	I_{rel} (%)	ΔP_V (kW)	I_{rel} (%)
Ved_1	1,1	50	6,072	31	43,951	83	0	0	11,489	43
Ved_2	0,9	50	2,398	21	27,570	73	0,593	11	5,433	32
Ved_3	1,5	25	2,175	16	2,243	16	2,311	16	2,188	16
Ved_4	1,2	25	1,244	13	1,282	13	1,320	14	1,251	13
Ved_5	1,8	25	3,101	17	3,196	17	3,291	18	3,119	17
Ved_6	2,2	35	5,039	21	19,895	42	39,007	58	0,607	7
Ved_7	3,1	25	5,889	18	6,124	18	6,034	18	5,847	18
Ved_8	2,5	25	0,670	7	0,697	7	0,686	7	0,665	7
Ved_9	1,8	50	21,058	45	0,563	7	60,922	77	10,812	32
Ved_10	0,6	50	9,422	52	0	0	24,230	84	5,349	39

Tab. 2.18: Vypočtené celkové hodnoty ztrát

	<i>SP1, SP2</i>	<i>SP1, SP3</i>	<i>SP2, SP3</i>	<i>SP1, SP2, SP3</i>
<i>Jméno</i>	ΔP (kW)	ΔP (kW)	ΔP (kW)	ΔP (kW)
Vedení	57,068	105,521	138,394	46,76
Transformátory	44,169	44,97	44,181	44,058
Celkové	101,237	150,491	182,575	90,818

Pokud budou v sepnutém stavu všechny 3 spínače, tak budou v soustavě nejnižší ztráty 90,818 kW a zároveň zatížení jednotlivých transformátorů bude téměř shodné. Je-li v rozepnutém stavu spínač SP1 nebo SP3 tak daný transformátor dodává výkon pouze do součtu odběrů, které reprezentují nevykreslené vývody, včetně krytí ztrát samotného transformátoru.

Rozbor zatížení a ztrát pro základní konfiguraci sítě (sepnuté spínače SP1 a SP2)

Celkové zatížení obou transformátorů:

$$P_{cz1} = \sum_{i=1}^5 P_{odb(i)} + P_{odb_{OP1}} = 2\,990 + 4\,880 = 7\,870 \text{ kW} \quad (2.4)$$

$$P_{cz2} = \sum_{i=6}^{10} P_{odb(i)} + P_{odb_{OP2}} = 3\,240 + 5\,250 = 8\,490 \text{ kW} \quad (2.5)$$

Celkové ztráty na vedeních na obou vývodech včetně ztrát transformátorů:

$$\Delta P_{c1} = \Delta P_{T1} + \sum_{i=1}^5 \Delta P_{V(i)} = 21,368 + 14,99 = 36,358 \text{ kW} \quad (2.6)$$

$$\Delta P_{c2} = \Delta P_{T2} + \sum_{i=6}^{10} \Delta P_{V(i)} = 22,801 + 42,078 = 64,879 \text{ kW} \quad (2.7)$$

Součet celkového zatížení a celkových činných ztrát poté odpovídá celkové dodávce potřebného výkonu P_{dod} napájecích transformátorů. Důležité je také zohlednit výkon, který u prvního transformátoru dodává na konci paprsku synchronní generátor (1 489 kW), o tento výkon je poté dodávka činného výkonu transformátoru snížena.

$$P_{c1} = P_{cz1} + \Delta P_{c1} + P_g = 7\,870 + 36,358 - 1\,489 = 6\,417,358 \text{ kW} = P_{dod1} \quad (2.8)$$

$$P_{c2} = P_{cz2} + \Delta P_{c2} = 8\,490 + 64,879 = 8\,554,879 \text{ kW} = P_{dod2} \quad (2.9)$$

2.7. Využití SW podpory DBP k výpočtu zkratových poměrů v síti

Výpočetní program DBP umožňuje provádět výpočty zkratových poměrů v elektrických sítích, čehož lze využít mimo jiné i v předmětu Přechné jevy v elektrizačních soustavách. Výpočet sítě probíhá metodou souměrných složek, ve zvoleném místě lze stanovit velikost pro jednofázový, dvoufázový, třífázový a dvoufázový zemní zkratový proud. Výstupem výpočtu jsou velikosti zkratových proudů a výkonů v místě zkratu a jeho okolí, tyto hodnoty jsou důležité zejména pro správné dimenzování rozvodného zařízení a správné nastavení ochrany.

2.7.1. Zadání projektu do předmětu PJES

- a) Namodelujte podle schématického podkladu sítě v programu DAISY Bizon Projektant.
- b) Nasimulujte jednofázový zkrat na vedení v místě A ve vzdálenosti 1,9 km od přípojnice 22 kV napájecího transformátoru pro 2 různé konfigurace (s připojeným a odpojeným generátorem) a vyšetřete velikost zkratových proudů, včetně vykreslení grafického průběhu zkratového proudu po vedení.
- c) Srovnajte varianty výpočtů v místě A pro 1-f, 2-f, 3-f a dvoufázový zemní zkrat (s připojeným generátorem).

2.7.1.1. Metodický postup

Před samotným výpočtem je důležité zkontrolovat nastavení programu, a to v hlavním menu režimu výpočtů přes submenu „Nastavení“ kliknutím na položku „Parametry výpočtů“ a poté na kartu „Zkraty“. V této kartě je doporučeno vybrat: *výpočet pro maximální proud*, *impedanční* typ výpočtu, výpočet dle normy ČSN a *počítat se zatížením sítě*, takové nastavení je většinou již implicitně nastaveno.

Principy modelování jednotlivých prvků sítě jsou totožné jako při výpočtu ustáleného chodu, o nichž pojednává kapitola 2.4., rozdíl je především v zadávání místa zkratu a dále v doplnění zkratových příspěvků u napájecích uzlů, v reálných situacích se obvykle do napájecích uzlů vkládají výsledky výpočtu zkratů v přípojném uzlu z nadřazené sítě, nicméně pro potřeby projektu se velikost zkratového příspěvku pro napájecí uzly určí ze zkratového výkonu nadřazené soustavy.

2.7.1.2. Zadávání zkratových příspěvků

Kliknutím pravého tlačítka myši na přípojnici 110 kV napájecích transformátorů a výběrem položky „Dialog objektu“ se zobrazí okno, v němž po kliknutí na kartu zkraty, lze zadávat velikosti zkratových příspěvků do uzlu, a to impedančně, zkratovým výkonem nebo rázovým zkratovým proudem, přičemž jednotlivé způsoby zadání se vzájemně přepočítávají. Zkratový příspěvek z nadřazené soustavy ve formě zkratového výkonu při trojfázovém zkratu se zapisuje dle zadání do příslušné kolonky v kartě zkraty (obr. 2.31), v náhradním schématu se soustava nahrazuje reaktancí, což se musí zohlednit i ve fázovém posunu. Analogickým způsobem lze zadat i zkratový příspěvek do uzlu, k němuž je připojen generátor a u něhož známe velikost zkratového výkonu, případně lze zadat příslušné parametry poměrných rázových reaktancí do dialogu generátoru (obr. 2.15 – zkratové parametry).

Obecné parametry | Rozpocet | Chod sítě | Zkrat | Uživatelské položky | Výsledky výpočtu zkratu

Rozšířené zadávání zkrat.příspěvku

Zkratový výkon (komplexní čísla)

S-3f 0,0 - 400,0 i MVA

S-1f 0,0 - 600,0 i MVA

Zkratový výkon (polární zadání)

S-3f 400,000 MVA 90,000 st.

S-1f 600,000 MVA 90,000 st.

Rázový zkratový proud (komplexní čísla)

I-3f 0,000 - 2,099 i kA

I-1f 0,000 - 3,149 i kA

Rázový zkratový proud (polární zadání)

I-3f 2,099 kA 90,000 st.

I-1f 3,149 kA 90,000 st.

Zkratové příspěvky (impedance)

R0 připoj. zdroje 0,000 Ohm

X0 připoj. zdroje 0,000 Ohm

ZN0 0,000 0,000 st.

R1 připoj. zdroje 0,000 Ohm

X1 připoj. zdroje 30,250 Ohm

ZN1 30,250 90,000 st.

Přepočít z reaktancí

Pomocný Napět.součinatel C 1

Slouží pouze pro přepočet v tomto dialogu

Obr. 2.31: Dialogové okno napájecího uzlu s kartou pro zadávání zkratových příspěvků

Parametry pro výpočet reaktancí a rezistancí jednotlivých vedení a transformátorů jsou definovány v typových tabulkách.

2.7.1.3. Umístění zkratu

Místo zkratu se volí v režimu výpočtů kliknutím pravého tlačítka myši na příslušný prvek sítě (úsek vedení nebo uzel), zkrat nelze umístit na ovládací prvky vývodů. Poté se objeví lokální menu, v němž lze vybrat položku „Jednoduchá porucha (zkrat)“. Poté se zobrazí dialogové okno pro zadávání dalších nezbytných parametrů potřebných k výpočtu (obr. 2.32). Dialogové okno tedy nabízí možnost volby typu zkratu, pro který se počítají zkratové poměry, případně lze počítat zkratové poměry pro jednofázový a třífázový zkrat ve všech uzlech sítě. Poté se upravují parametry zkratu, kde se volí výchozí napětí uzlů v závislosti na daném provozu sítě, přičemž nejvhodnější je varianta „Výsledky chodu sítě se zátěží“, kdy ještě před samotným výpočtem zkratů dochází k výpočtu ustáleného chodu sítě a zajištění takových napěťových poměrů jako při normálním provozním stavu před poruchou. Varianta „Výsledky chodu sítě naprázdno“ využívá výpočet bez zatížení a velikost napětí ve všech uzlech je dána napětím ve vztažném uzlu. Pro detailní výsledky lze také zaškrtnout položku „Úplné (včetně úhlů apod.)“. Velikost napěťového součinitele c se volí na základě požadavku pro výpočet buď minimálního ($c_{min} = 1$) nebo maximálního ($c_{max} = 1,1$) zkratového proudu (platí pro soustavu VN). Parametr „Vzdálenost od zkratu ve větvích, kde chcete vypisovat výsledky“ se využívá především u rozsáhlých sítí a určuje, v jaké vzdálenosti od místa zkratu se ještě mají počítat zkratové hodnoty.

Umístěním zkratu na vedení lze provést výpočet buď pro jeden zkrat, nebo lze počítat rozložení zkratových hodnot podél větve. Pro *jeden zkrat* je nutné zadat jeho vzdálenost od jednoho z uzlů, jež vedení propojuje, druhá vzdálenost se automaticky dopočítá, vzdálenost samozřejmě nesmí být větší, než je délka úseku vedení. U položky *rozložení zkratu podél větve* je dále možnost úsek vedení rozdělit na několik dílů o stejné vzdálenosti, na rozhraní jednotlivých dílů se poté uvažuje s místy zkratů, pro které bude proveden výpočet. Případně lze vedení rozdělit na úseky o určité délce, vznikne poté tolik rozhraní, kolik je možných v závislosti na celkové délce úseku vedení (poslední díl poté může být kratší než předchozí).

Obr. 2.32: Dialogové okno pro definici zkratů

2.7.1.4. Výpočet zkratových poměrů


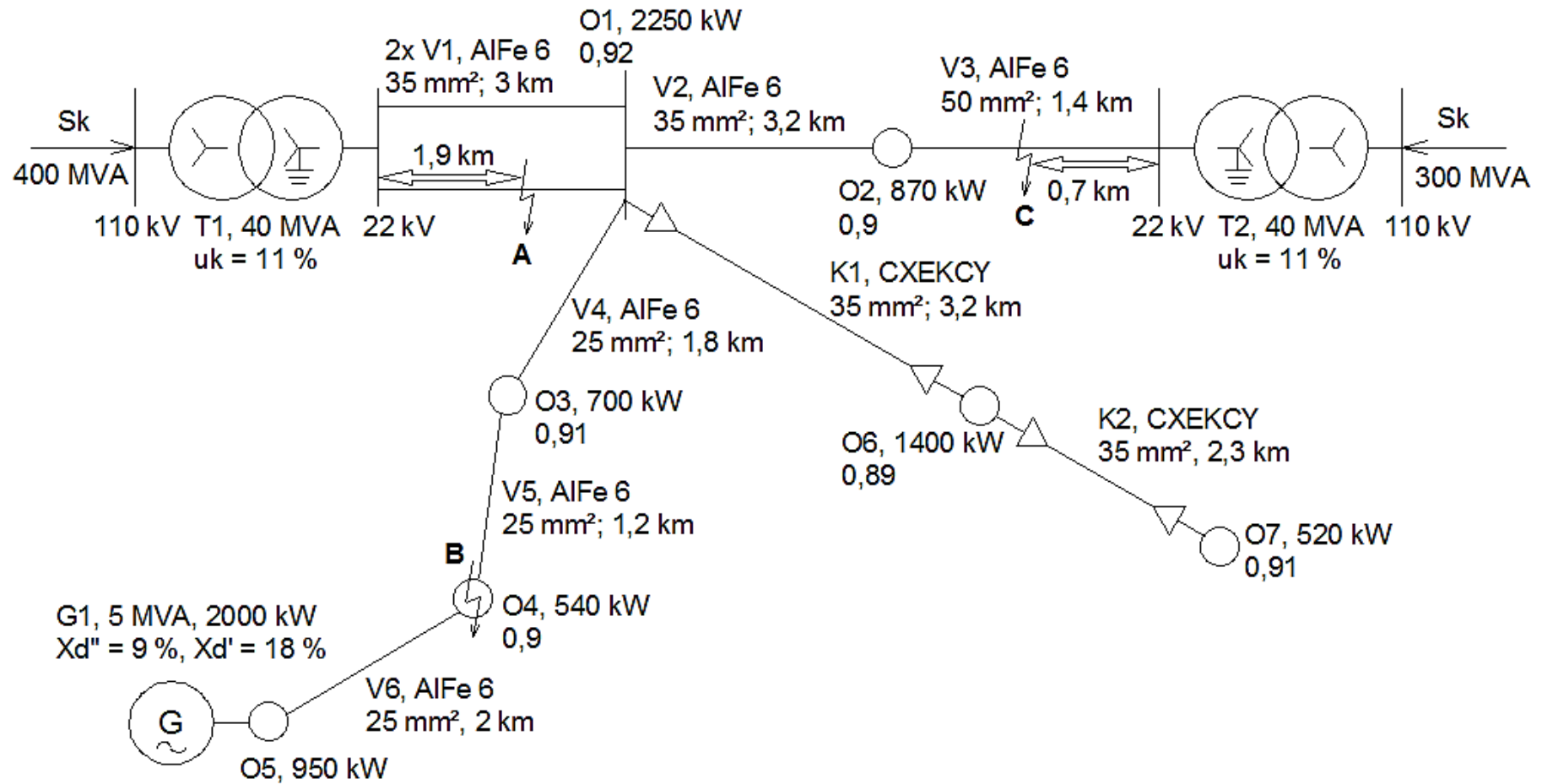
Po umístění zkratu, jež je v namodelovaném schématu reprezentovaný příslušnou ikonou, lze provést výpočet pomocí klávesy F8, nebo kliknutím na ikonu  „Výpočty zadaného zkratu“ umístěnou v horní liště pracovní plochy, případně již v dialogovém okně pro definici zkratů pomocí tlačítka „Výpočet“. Po výpočtu program vygeneruje zprávu s výsledky. Pokud se při definici zkratu na vedení zvolí rozložení zkratu podél větve, tak program vygeneruje grafickou závislost zobrazující průběh zkratového výkonu případně proudu po vedení.

Schéma projektu



Obr. 2.33: Schéma projektu

Je nutné upozornit, že schéma je fiktivní a slouží pouze jako výukový materiál. V České republice jsou distribuční VN soustavy provozovány přednostně jako nepřímě uzemněné přes zhášecí tlumivku a spojení jedné fáze se zemí se označuje jako zemní spojení.

2.7.2. Výsledné hodnoty zkratových poměrů

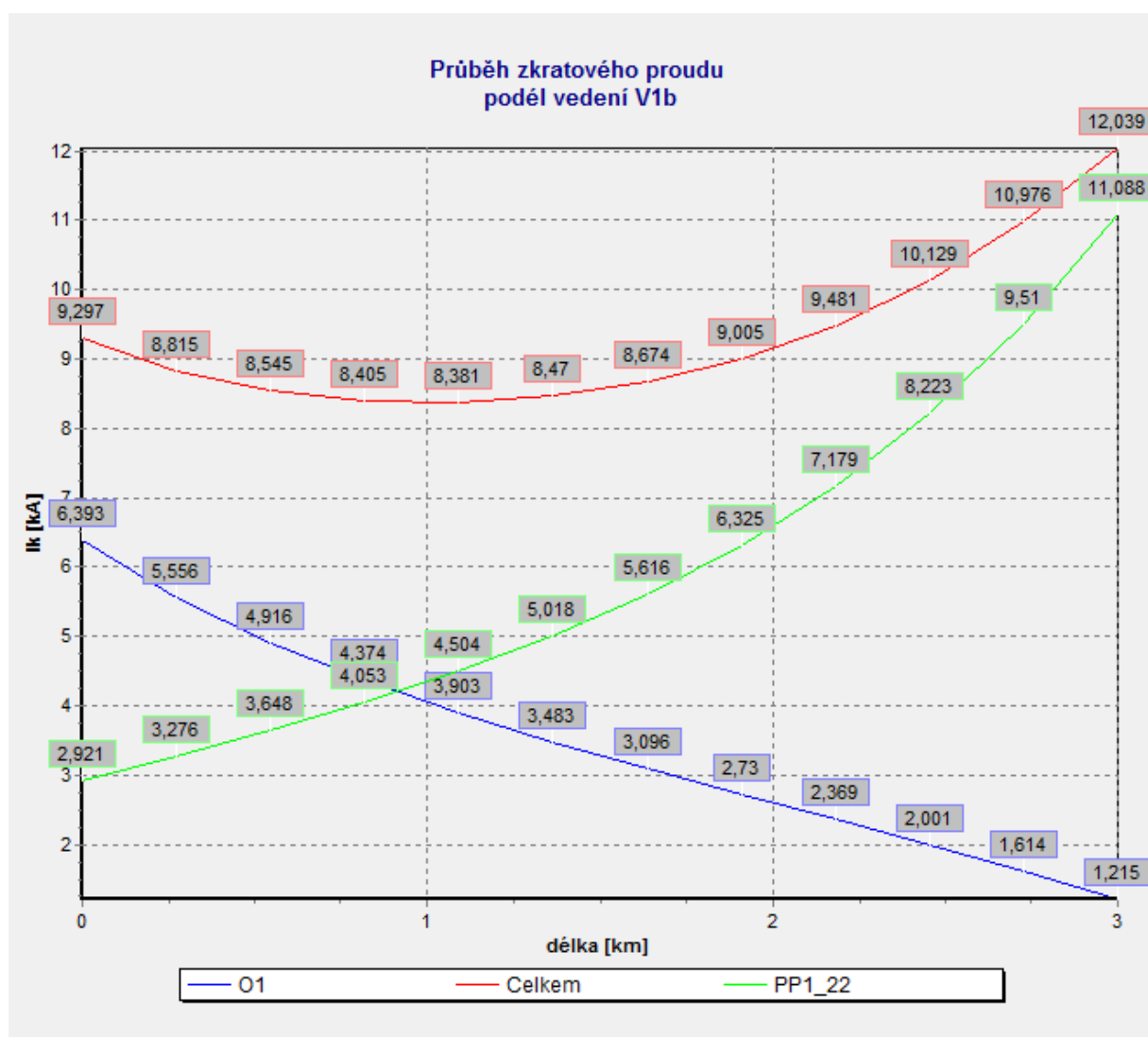
Na základě metody souměrných složek byl proveden výpočet zkratových poměrů v síti s připojeným generátorem (tab. 2.19 a 2.20) a bez připojeného generátoru (tab. 2.21 a 2.22).

Tab. 2.19: Toky do zkratu na vedení (zkrat fáze R)

Od uzlu	\hat{I}_R (kA)	\hat{S} (MVA)	$3\hat{I}_0$ (kA)
O1	$3,888 \cdot e^{j314^\circ}$	148,156	$3,941 \cdot e^{j315,794^\circ}$
PP1_22	$4,52 \cdot e^{j305^\circ}$	172,238	$4,491 \cdot e^{j303,349^\circ}$
Celkem	$8,382 \cdot e^{j129,163^\circ}$	319,542	$8,382 \cdot e^{j129,163^\circ}$

Tab. 2.20: Zkratová napětí včetně fázového natočení v místě poruchy postiženého vedení

	\hat{U}_1 (kV)	\hat{U}_2 (kV)	\hat{U}_0 (kV)	\hat{U}_R (kV)	\hat{U}_S (kV)	\hat{U}_T (kV)
V1b	10,118 (359,184°)	4,378 (180,598°)	5,742 (178,106°)	0 (0°)	15,036 (234,678°)	15,409 (123,581°)



Obr. 2.34: Grafický průběh zkratového proudu podél vedení

Bez připojeného generátoru

Tab. 2.21: Toky do zkratu na vedení (zkrat fáze R)

Od uzlu	\hat{I}_R (kA)	\hat{S} (MVA)	$3\hat{I}_0$ (kA)
O1	$3,486 \cdot e^{j313,078^\circ}$	132,853	$3,741 \cdot e^{j314,89^\circ}$
PP1_22	$4,494 \cdot e^{j304,523^\circ}$	171,246	$4,264 \cdot e^{j302,445^\circ}$
Celkem	$7,959 \cdot e^{j128,259^\circ}$	303,265	$7,959 \cdot e^{j128,26^\circ}$

Tab. 2.22: Zkratová napětí včetně fázového natočení v místě poruchy postiženého vedení

	\hat{U}_1 (kV)	\hat{U}_2 (kV)	\hat{U}_0 (kV)	\hat{U}_R (kV)	\hat{U}_S (kV)	\hat{U}_T (kV)
V1b	9,954 (358,774°)	4,507 (180,675°)	5,452 (177,202°)	0 (0°)	14,695 (235,579°)	15,212 (121,859°)

Z tabulek plyne, že v síti s připojeným generátorem je velikost jednofázového zkratového proudu vyšší, čili generátor svým výkonem přispívá k celkové velikosti zkratového proudu. V místě zkratu klesne velikost fázového napětí na 0 V, což také potvrzuje součet složkových napětí. Celková velikost jednofázového zkratového proudu postižené fáze R je rovna trojnásobku netočivé složky.

Graf znázorňuje průběhy hodnot z jednoho a druhého konce vedení, přičemž modrá křivka označuje hodnoty zkratových proudů od počátečního uzlu (O1), zelená od koncového uzlu (PP1_22) a červená křivka určuje celkovou velikost zkratového proudu v daném bodě. Nejvyšší hodnoty jsou blíže u napájecího uzlu PP1_22, jelikož nejvyšší zkratový výkon teče z nadřazené soustavy.

Tab. 2.23: Srovnání jednotlivých variant výpočtů zkratů a jejich hodnoty v daných fázích

Varianta	\hat{I}_R (kA)	\hat{I}_S (kA)	\hat{I}_T (kA)
1-f (R-GND)	$8,382 \cdot e^{j129,163^\circ}$	-	-
2-f (S-T)	-	$8,011 \cdot e^{j38,176^\circ}$	$8,011 \cdot e^{j218,176^\circ}$
3-f (R-S-T)	$9,251 \cdot e^{j128,176^\circ}$	$9,251 \cdot e^{j248,176^\circ}$	$9,251 \cdot e^{j8,176^\circ}$
2-fz (S-T-GND)	-	$8,988 \cdot e^{j12,963^\circ}$	$8,771 \cdot e^{j244,06^\circ}$

Nejvyšší hodnota zkratového proudu nastane v síti při trojfázovém zkratu, kdy všechny tři fáze jsou stejně postiženy a vedou stejný zkratový proud 9,251 kA, naopak nejnižší hodnota zkratového proudu nastane při dvoufázovém zkratu, a to 8,011 kA, což je hodnota $\frac{\sqrt{3}}{2}$ krát nižší než je velikost trojfázového zkratu. Nepostiženými fázemi tečou provozní proudy do okamžiku vypnutí poruchy pomocí ochrany.

Zkratové poruchy v místech B a C si mohou studenti vypočítat v rámci cvičení, výsledky jsou k dispozici v přílohách.

2.8. Návrh jištění

Program nabízí podporu návrhu jištění pomocí doplňkového poloautomatického modulu – Průvodce návrhem jištění, který umožňuje provést výpočet dle zvolených parametrů. Mezi tyto parametry patří jištění ve všech skříních, jištění na obou koncích linky, sjednocení pojistek

v rámci skříně, zohlednění stávajících pojistek v heuristice, čas vypnutí poruchy a koeficient bezpečnosti pro zkratový proud. Po spuštění výpočtu se kontroluje stávající jištění sítě a místa slabých vazeb na daných úsecích vedení. Poté si lze vybrat, dle výrobce, určitou řadu pojistek, kterou má program pro návrh použít, následuje zpracování a dokončení návrhu jištění. Po dokončeném návrhu se zobrazí okno umožňující kontrolu výsledků, včetně jištění jednotlivých uzlů a vložených pojistek včetně jmenovitých hodnot.

Návrh jištění v programu DBP ve vzdělávací verzi není vhodným nástrojem pro řešení úloh v oblasti vysokého napětí, návrh je určen primárně pro nízké napětí.

Závěr

Teoretická část diplomové práce se zabývá popisem elektrického modelu sítě v souvislosti s použitým programem DAISY Bizon Projektant, tedy jednotlivými typy uzlů a větví, které dané uzly elektricky propojují. Součástí teorie je také matematické odvození Newton-Raphsonovy metody, jež daný software využívá k řešení ustáleného chodu sítě a dále vysvětlení problematiky poruchových stavů s důrazem na zkratové poruchy a způsob jejich výpočtu pomocí metody souměrných složek.

Praktická část diplomové práce se zabývá návrhem variantních zadání výpočetních úloh využitelných v běžné výuce v předmětech Projektování elektrických distribučních sítí (PEDS) a Přejídné jevy v elektrizačních soustavách (PJES). Tyto úlohy jsou na základě mapového podkladu, jež reprezentuje zjednodušenou fiktivní paprskovou síť, namodelovány v softwarovém prostředí programu DAISY Bizon Projektant verze 4.60 build 777. Pro správné namodelování dané sítě je sestaven podrobný návod, tedy tvorba jednotlivých odběrových uzlů, přípojníc pro namodelování transformátoru, pomocných uzlů k vytvoření T-odbočky a k možnému připojení zdroje – generátoru. Vzájemné propojení již sestavených prvků sítě je umožněno pomocí vedení s určitým průřezem a délkou, přičemž se využívá především venkovního vedení - AlFe lan. Součástí úloh je kromě namodelování dané sítě také vypracování dílčích úkolů dle textového zadání, o čemž pojednává kapitola 2.5, v níž je vzorové řešení prvního zadání a další postupy objasňující práci s programem. Po správném sestavení sítě lze provést výpočet ustáleného chodu pro různé konfigurace např. s odpojeným zdrojem, odpojeným záložním vedením či odpojeným paprskem na přípojnici 22 kV napájecího transformátoru, takto modifikované konfigurace poté umožňují analyzovat chování sítě při různých provozních stavech, včetně konstrukce grafických závislostí rozložení napětí v celé síti (obr. 2.19 – 2.22 a 2.26 – 2.27). V rámci analýzy sítě se zjišťuje i velikost dodávky elektrické energie pomocí připojeného generátoru tak, aby v kterémkoliv uzlu po jeho připojení nebyla překročena dovolená změna napětí o 2 %, limitní činný výkon byl stanoven na 1 138 kW. Hospodárnost provozu sítě lze určit pomocí velikostí činných ztrát na transformátoru a vedeních (tab. 2.9 a obr. 2.25), nejvyšší ztráty budou v síti v případě, že danou síť napájí pouze transformátor. Ekonomická stránka sítě se vyhodnocuje na základě metody čisté současné hodnoty (NPV), jejímž výsledkem je celkový kumulovaný cash flow za sledovaných 20 let provozu, který pro danou síť činí k roku 2041: 86,747 mil. Kč.

V souvislosti s předmětem PJES se diplomová práce zabývá i využitím programu DBP k výpočtu zkratových poměrů v síti. V kapitole 2.7 je vysvětleno zadávání zkratových příspěvků do namodelované sítě sestavené dle schématu, včetně umístění zkratu a následného výpočtu. Výpočet je proveden pro jednofázový zkrat na vedení ve vzdálenosti 1,9 km od přípojnice 22 kV napájecího transformátoru, a to jak s připojeným generátorem (8,382 kA), tak bez připojeného generátoru (7,959 kA) a je tedy zřejmé, že generátor svým výkonem přispívá k celkové velikosti zkratového proudu. Rovněž je vykreslen grafický průběh zkratového proudu podél vedení (obr. 2.34). Jednotlivé druhy zkratů srovnává tabulka 2.23.

Přínos diplomové práce je především ve vysvětlení práce s programem DAISY Bizon Projektant a v návrhu nových variantních zadání semestrálních projektů pro předmět PEDS a také využití daného programu v předmětu PJES. Práce by se mohla dále rozvíjet po případné aktualizaci softwaru a přidání nových funkcí.

Literatura

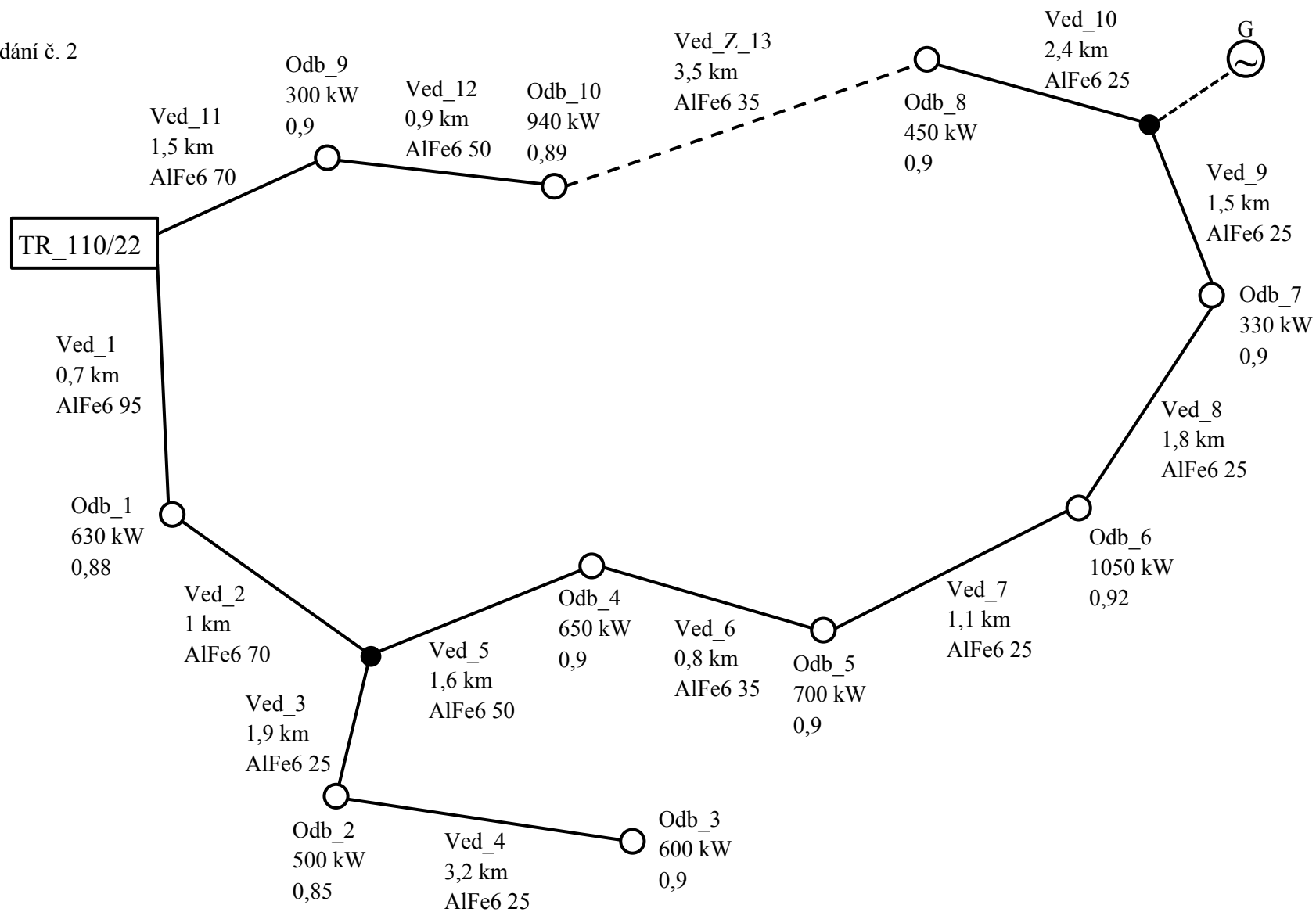
- [1] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. [Praha]: Asociace energetických manažerů (AEM), 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [2] DAISY, spol. s.r.o. *Uživatelská příručka: program DAISY Bizon projektant ver. 4.4x* [online dokument pdf]. Verze 1.62. Praha, únor 2016 [cit. 2021-03-08]
- [3] RUSEK, Stanislav. *Teoretická elektroenergetika: Učební texty* [online dokument pdf]. Ostrava, 2012 [cit. 2021-03-08]
- [4] HODINKA, Miloslav, Štefan FECKO a František NĚMEČEK. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00065-3.
- [5] VELEBA, Jan. *MvE, Řešení chodu sítě - Přednáška č. 6*, YouTube [online]. 6.4.2020 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=1n8HvxosnZU&t=0s>
- [6] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [7] GURECKÝ, Jiří. *Poruchové stavy v elektrizační soustavě* [přednáška]. Ostrava, 26. 11. 2018
- [8] MEDVEC, Zdeněk. *Poruchy a chránění elektrických sítí* [online dokument pdf]. (1. díl – Poruchy). Ostrava, 2013 [cit. 2021-04-02]
- [9] MEDVEC, Zdeněk. *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách: návody do cvičení*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2001. ISBN 80-7078-856-9.
- [10] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [11] DAISY Bizon Projektant. *Daisy.cz | Výpočty elektrických sítí - produkty a služby pro projektování a provoz distribučních sítí el. energie* [online]. Praha [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://daisy.cz/web/produkty/daisy-bizon-projektant/>

Seznam příloh

Přílohy obsahují jednotlivá zadání ve formě mapových podkladů včetně základního řešení, tj. s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením. A také výsledné hodnoty při zkratech v místech B a C. Zdrojové soubory jednotlivých variant semestrálních úloh byly předány na paměťovém nosiči vedoucímu diplomové práce.

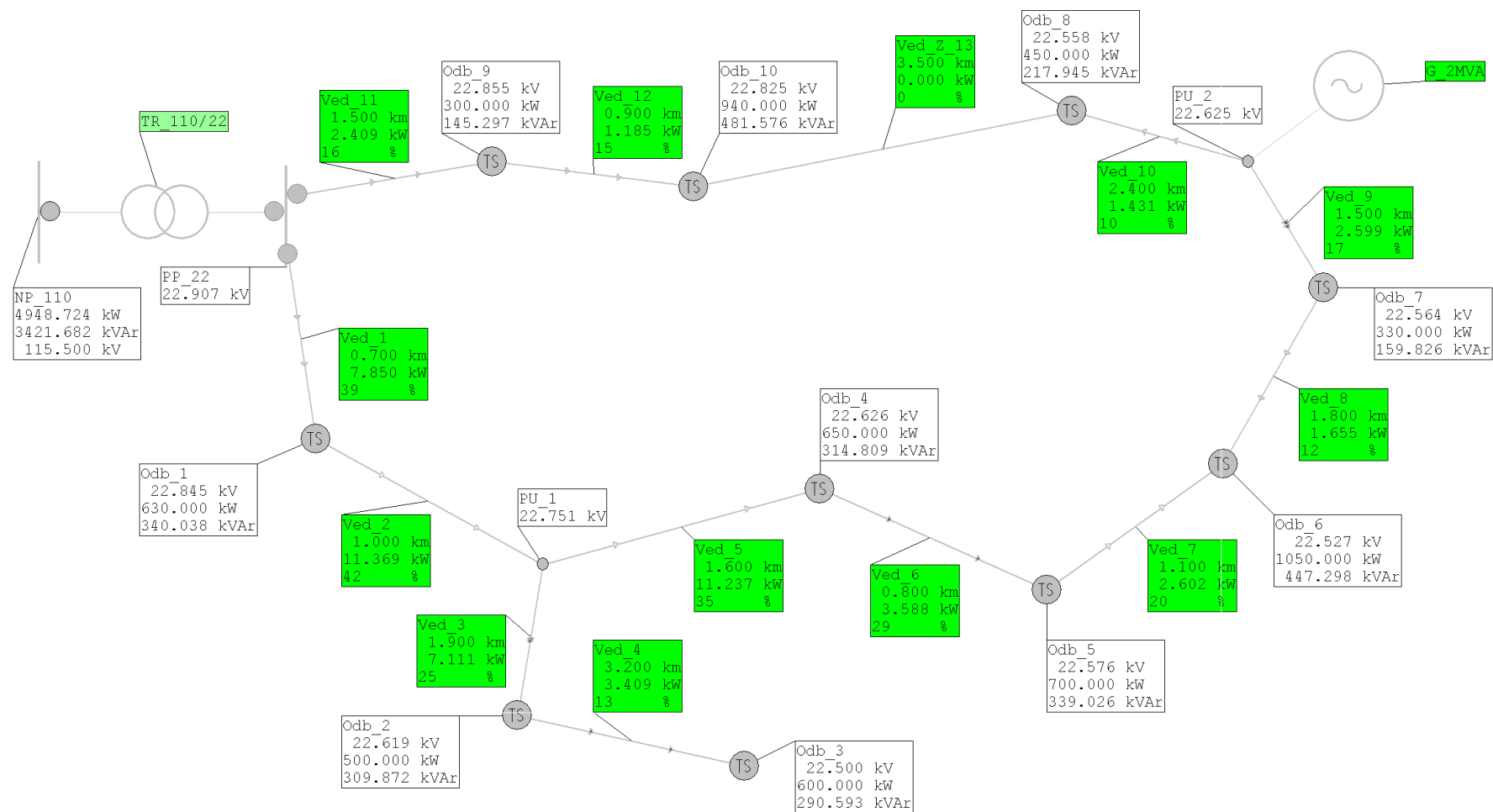
Zadání č. 2.....	I
Schéma s výsledky pro zadání č. 2.....	II
Zadání č. 3.....	III
Schéma s výsledky pro zadání č. 3.....	IV
Zadání č. 4.....	V
Schéma s výsledky pro zadání č. 4.....	VI
Zadání č. 5.....	VII
Schéma s výsledky pro zadání č. 5.....	VIII
Zadání č. 6.....	IX
Schéma s výsledky pro zadání č. 6.....	X
Zadání č. 7.....	XI
Schéma s výsledky pro zadání č. 7.....	XII
Zadání č. 8.....	XIII
Schéma s výsledky pro zadání č. 8.....	XIV
Zadání č. 9.....	XV
Schéma s výsledky pro zadání č. 9.....	XVI
Zadání č. 10.....	XVII
Schéma s výsledky pro zadání č. 10.....	XVIII
Zadání č. 11.....	XIX
Schéma s výsledky pro zadání č. 11.....	XX
Zadání č. 12.....	XXI
Schéma s výsledky pro zadání č. 12.....	XXII
Zadání č. 13.....	XXIII
Schéma s výsledky pro zadání č. 13.....	XXIV
Zadání č. 14.....	XXV
Schéma s výsledky pro zadání č. 14.....	XXVI
Zadání č. 15.....	XXVII
Schéma s výsledky pro zadání č. 15.....	XXVIII
Zadání č. 16.....	XXIX
Schéma s výsledky pro zadání č. 16.....	XXX
Zadání č. 17.....	XXXI
Schéma s výsledky pro zadání č. 17.....	XXXII
Zadání č. 18.....	XXXIII
Schéma s výsledky pro zadání č. 18.....	XXXIV
Výsledné hodnoty při zkratech v místech B a C.....	XXXV

Zadání č. 2



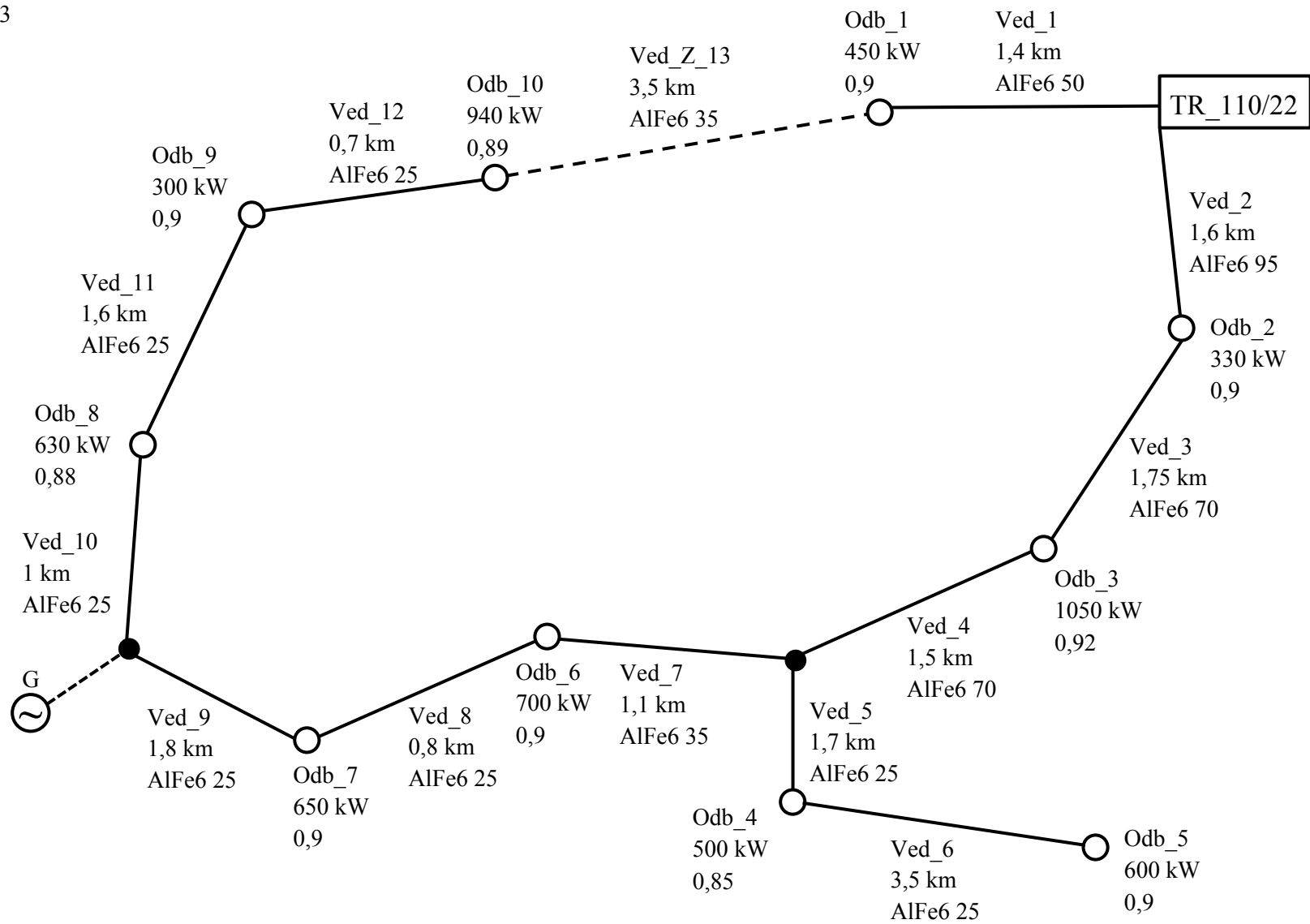
Obr. i: Mapový podklad č. 2

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 278 kW.



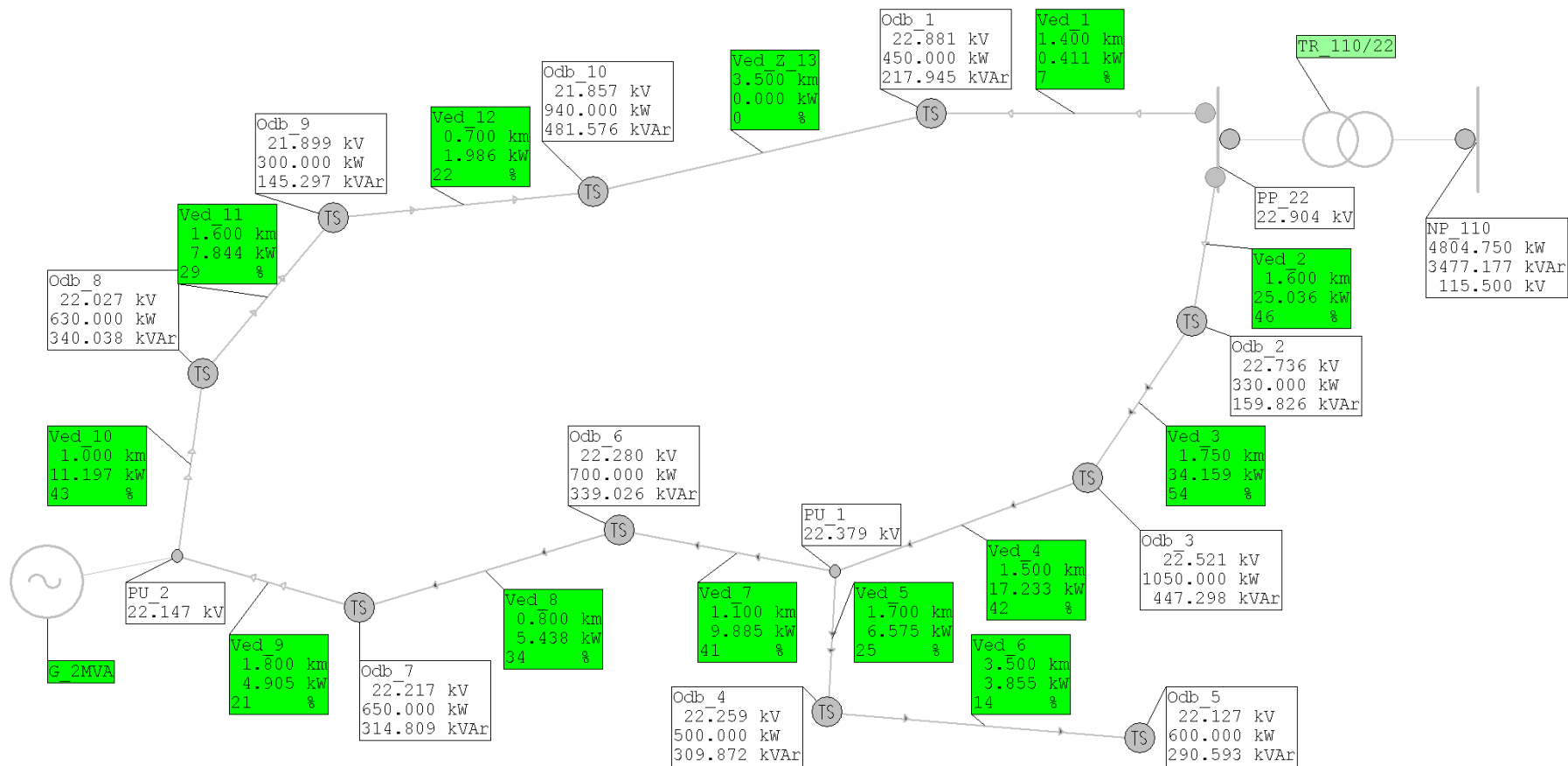
Obr. ii: Schéma s výsledky pro zadání č. 2

Zadání č. 3



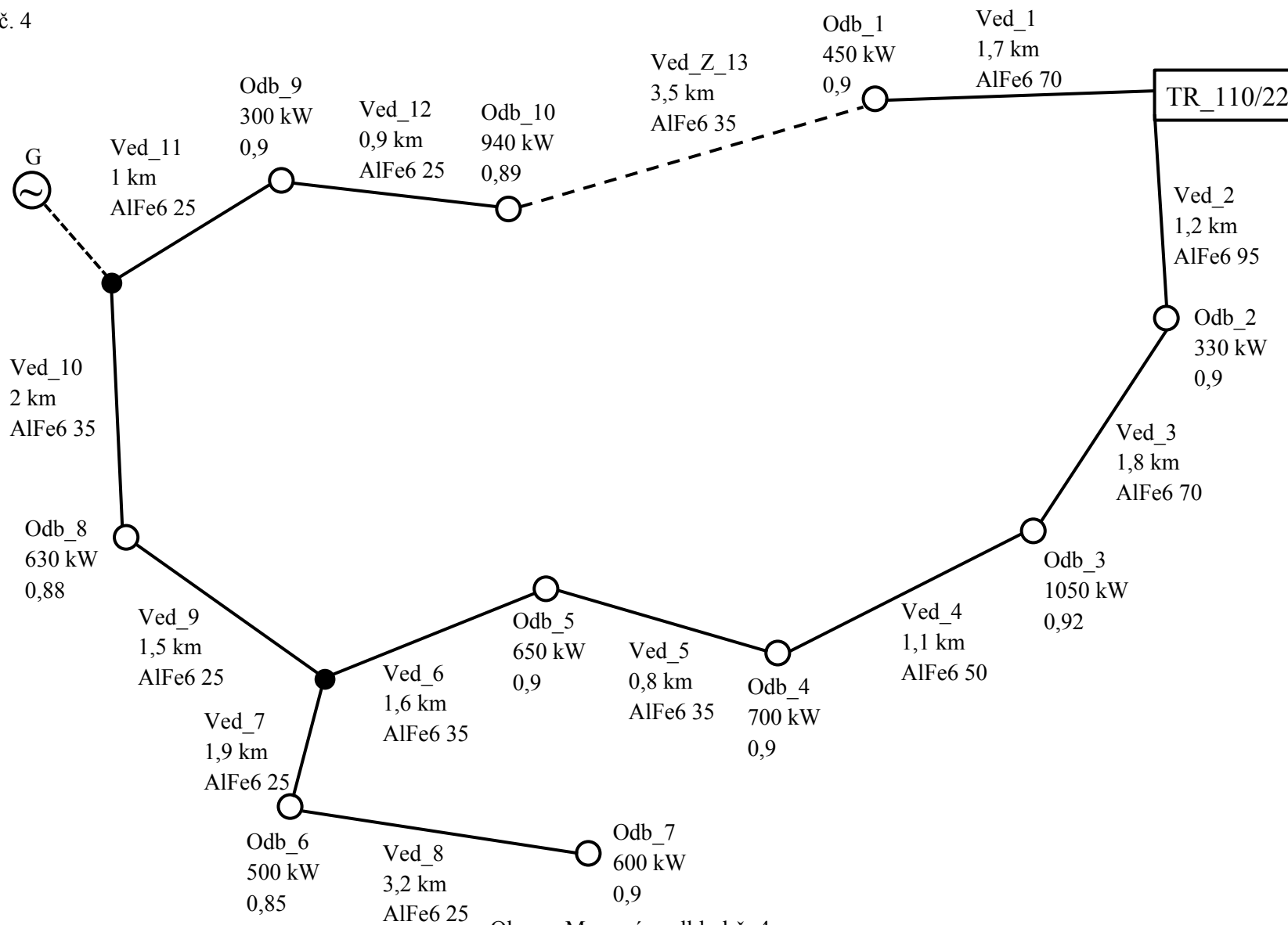
Obr: iii: Mapový podklad č. 3

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 494 kW.



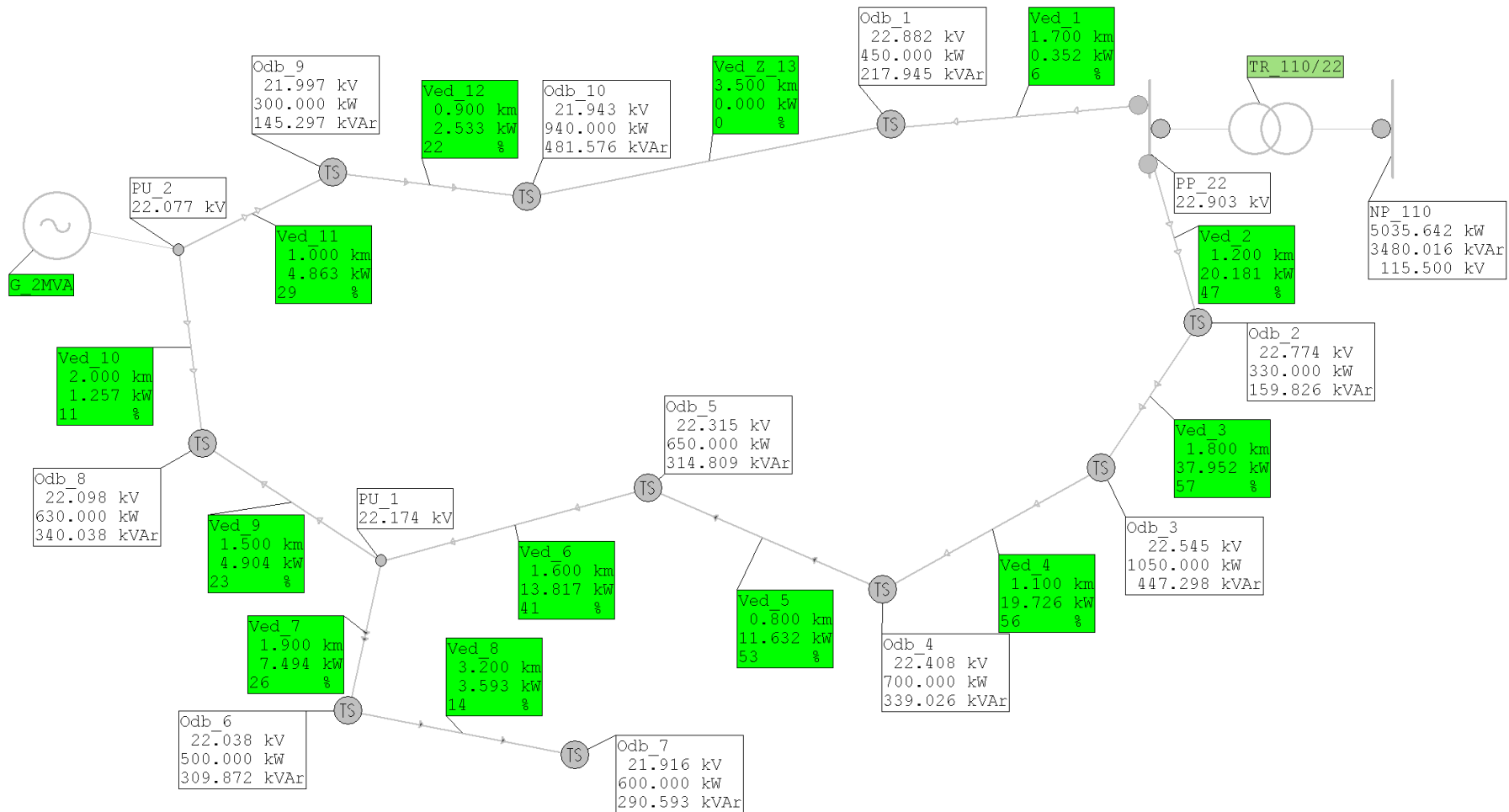
Obr. iv: Schéma s výsledky pro zadání č. 3

Zadání č. 4



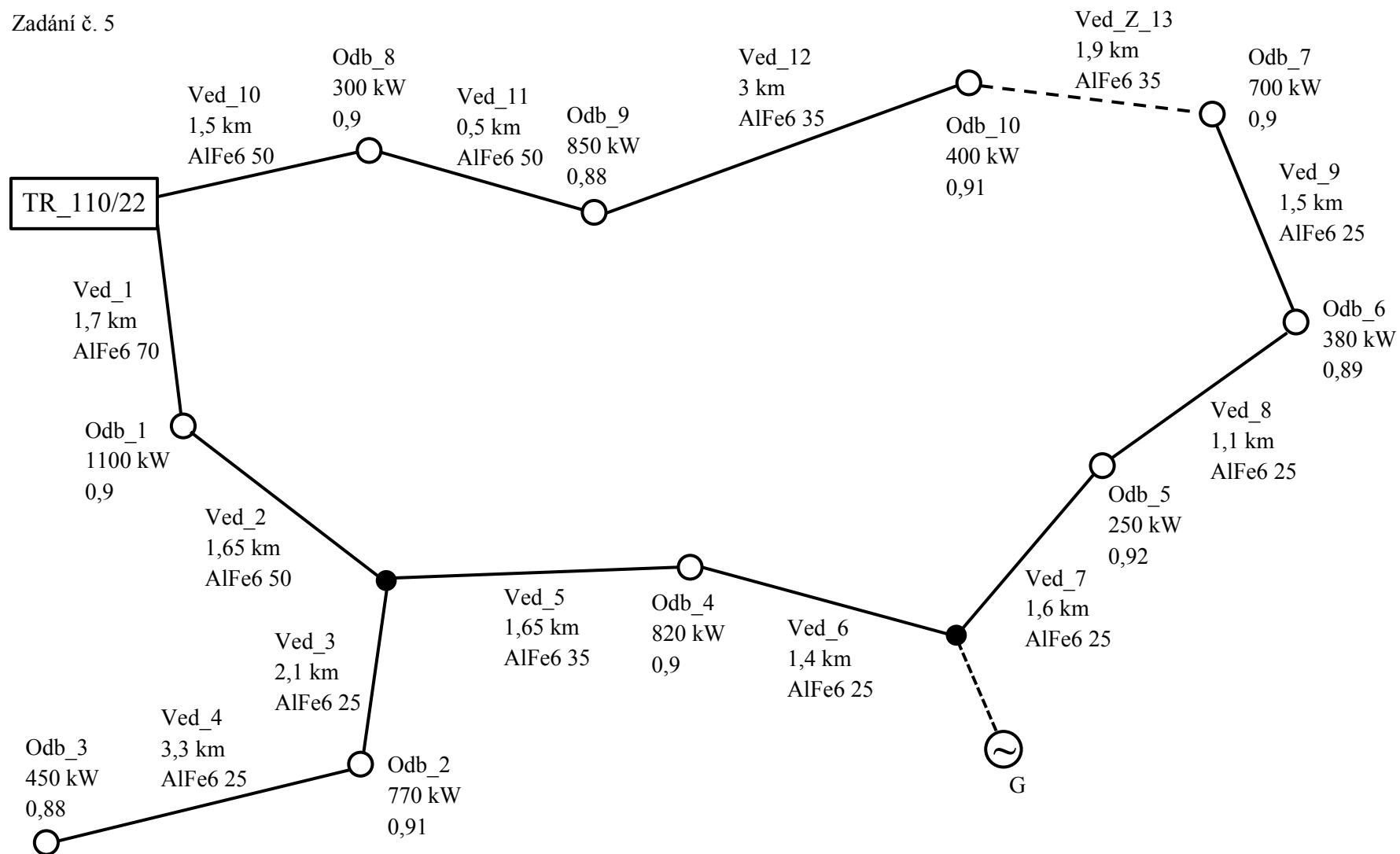
Obr. v: Mapový podklad č. 4

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 263 kW.



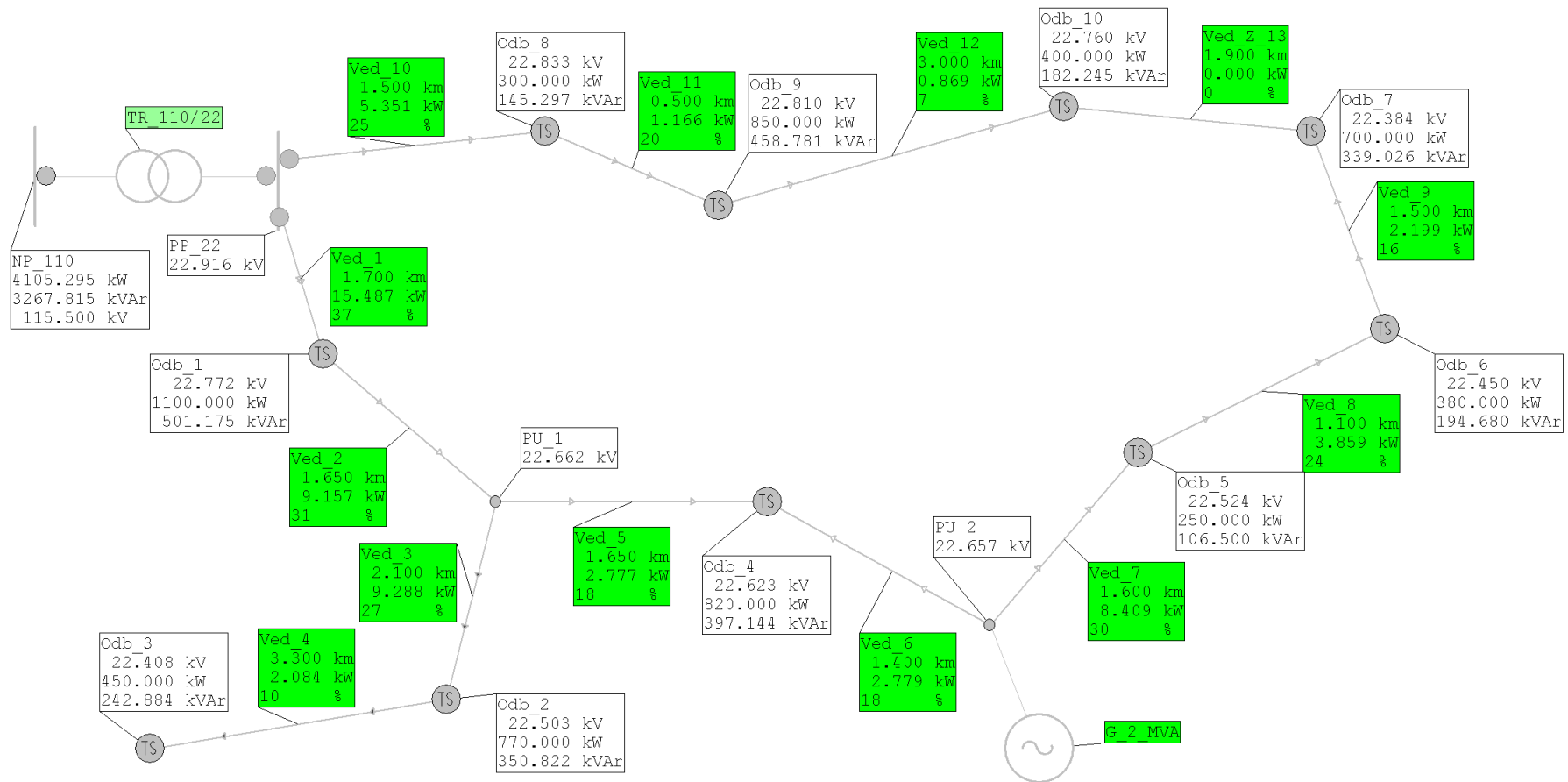
Obr. vi: Schéma s výsledky pro zadání č. 4

Zadání č. 5



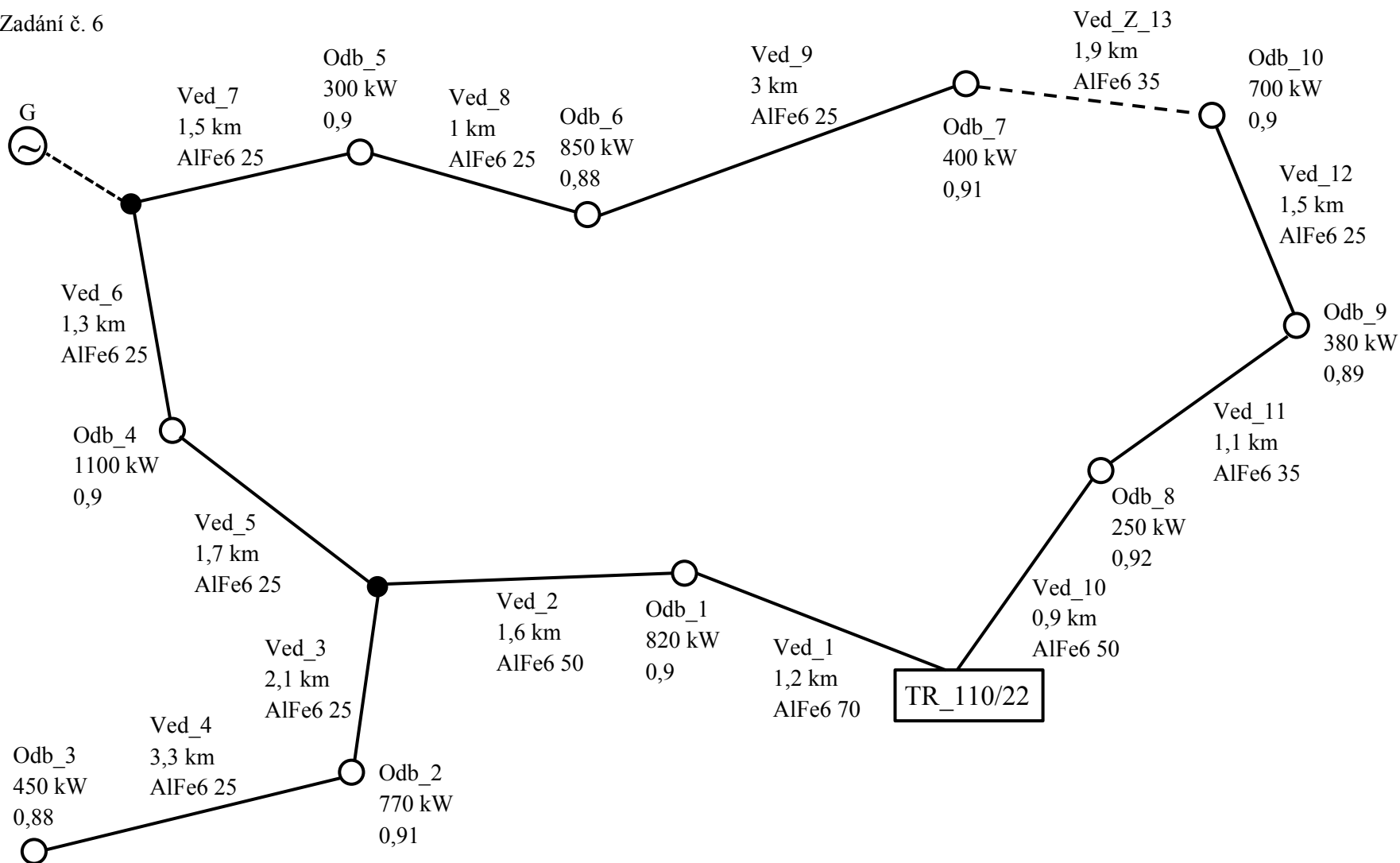
Obr. vii: Mapový podklad č. 5

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 998 kW.



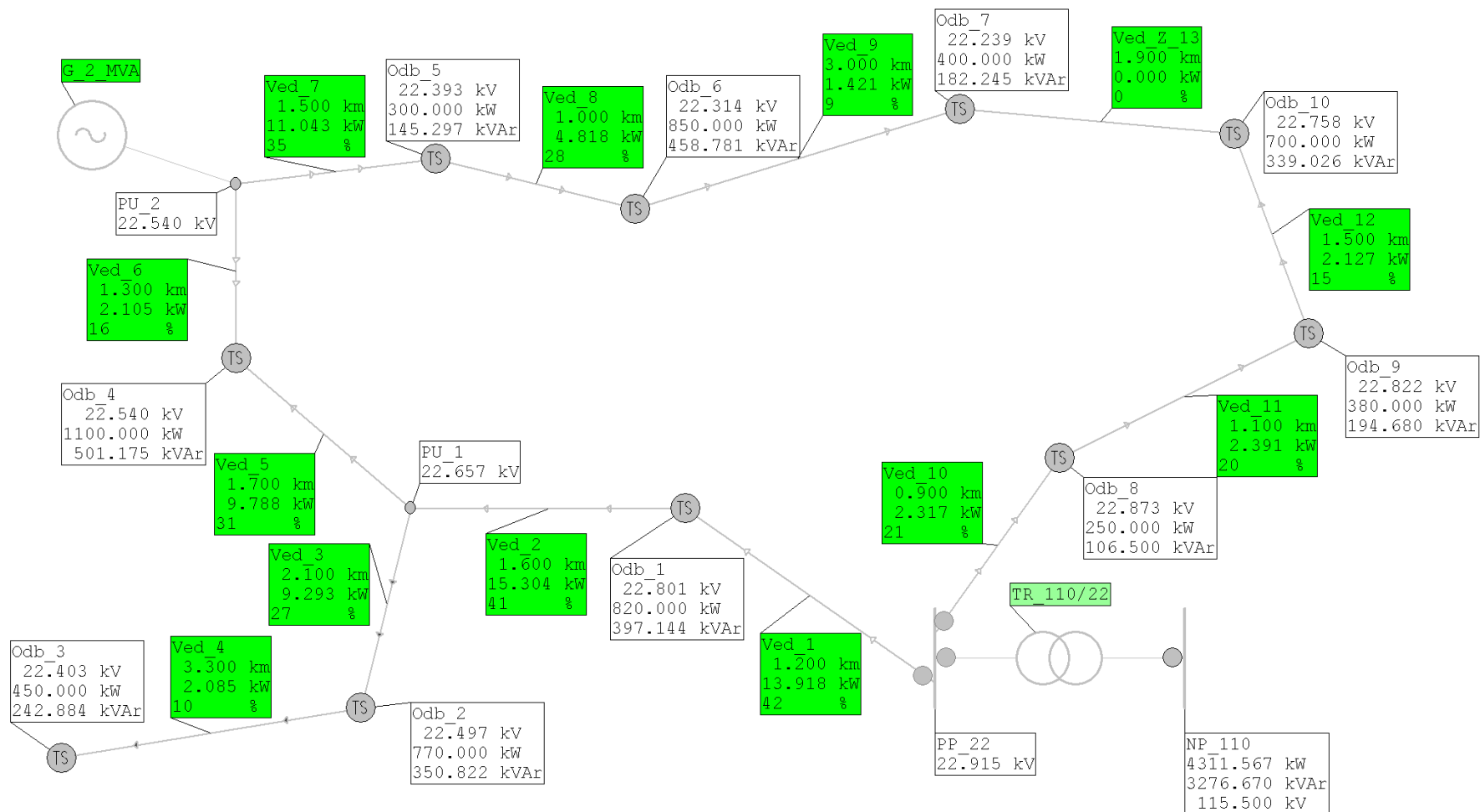
Obr. viii: Schéma s výsledky pro zadání č. 5

Zadání č. 6



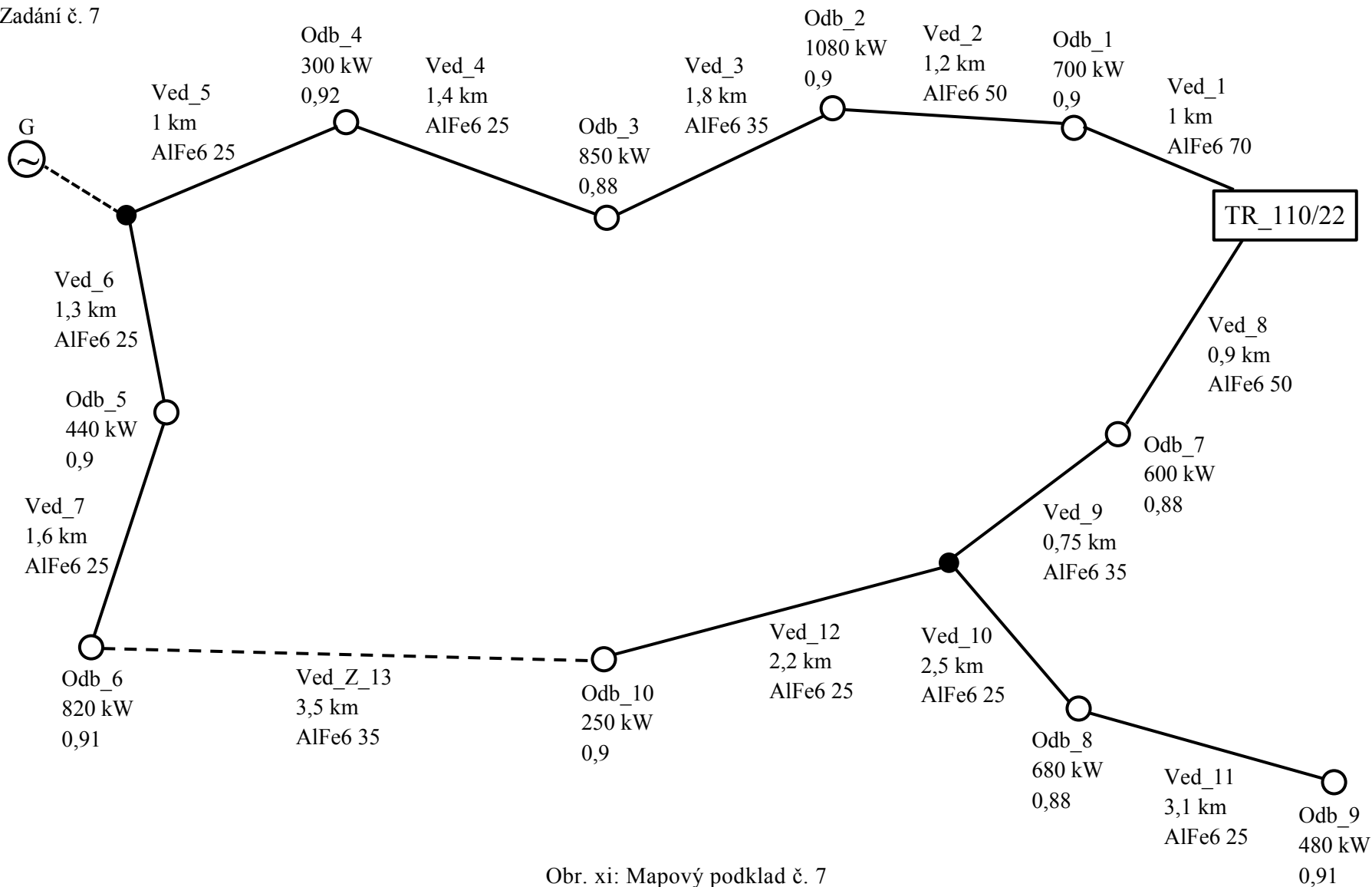
Obr. ix: Mapový podklad č. 6

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 805 kW.



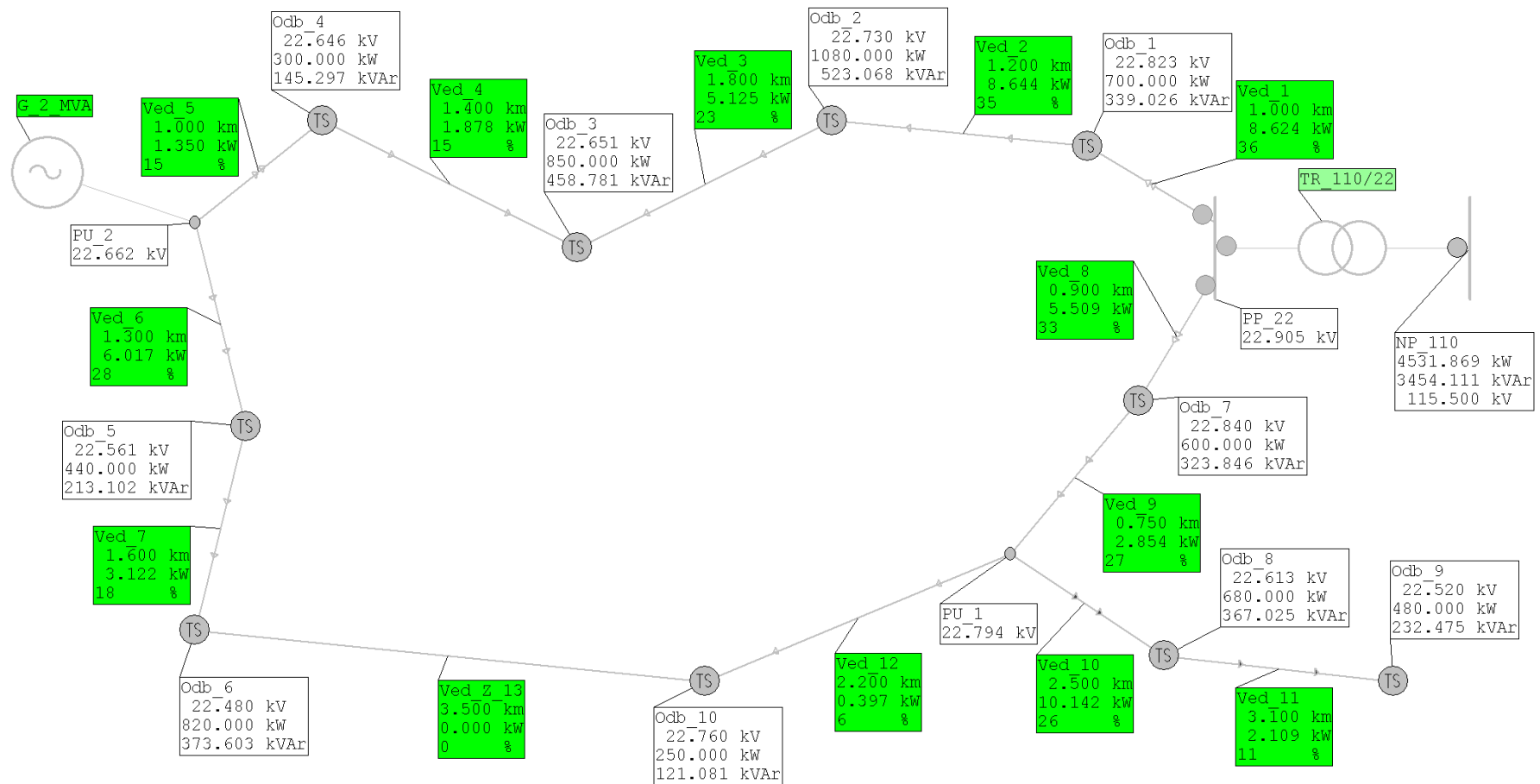
Obr. x: Schéma s výsledky pro zadání č. 6

Zadání č. 7



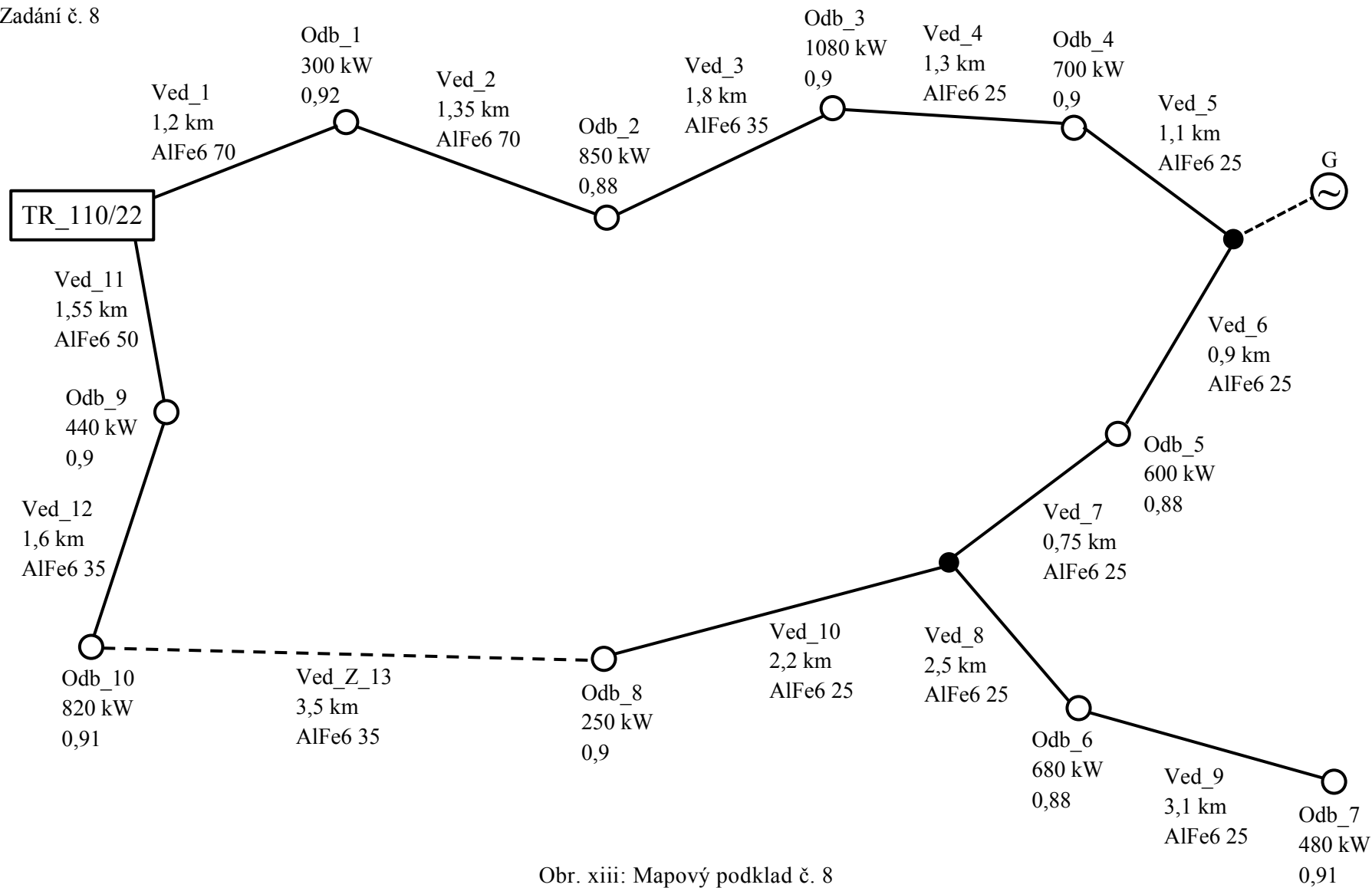
Obr. xi: Mapový podklad č. 7

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 744 kW.



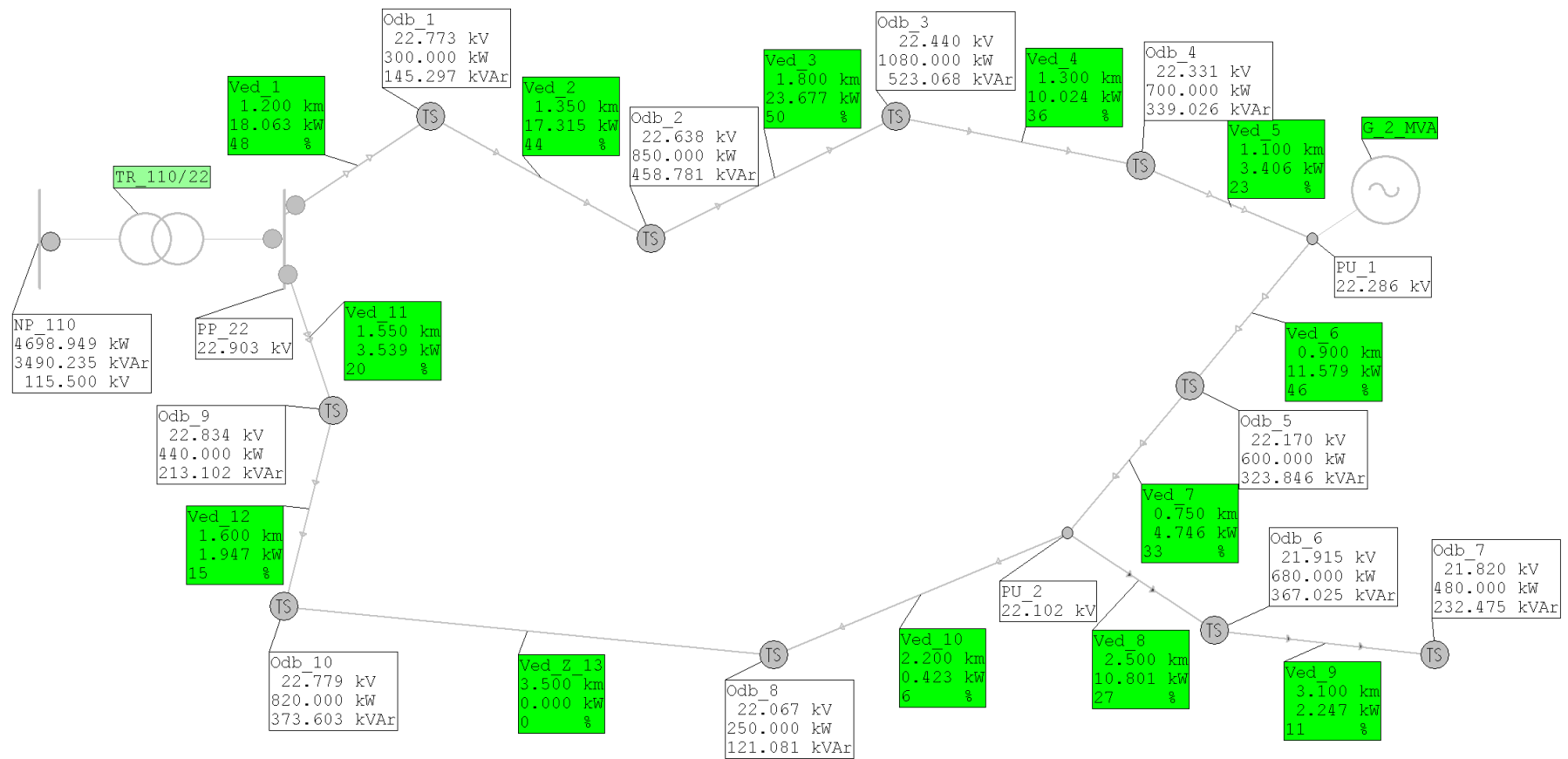
Obr. xii: Schéma s výsledky pro zadání č. 7

Zadání č. 8



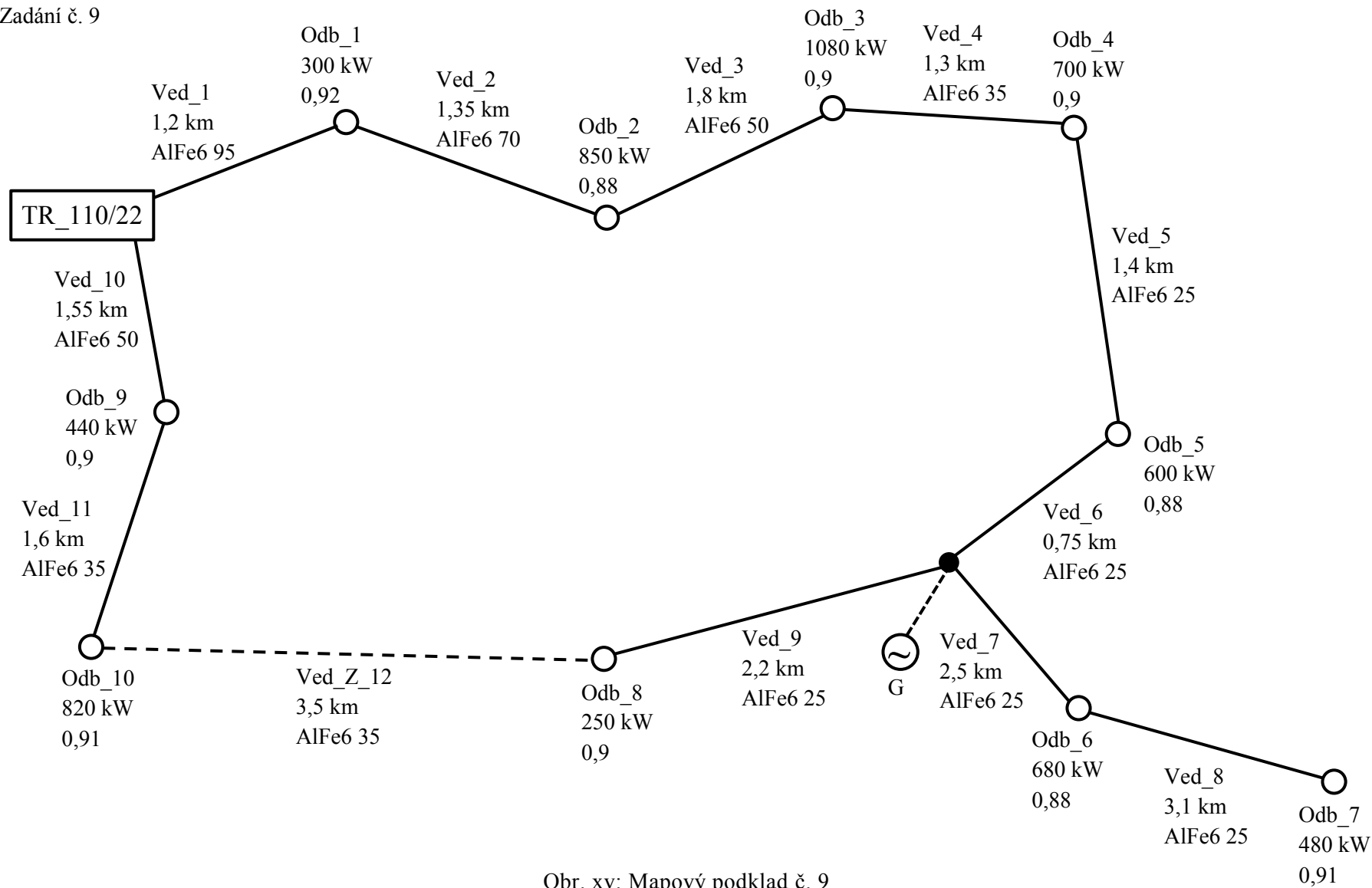
Obr. xiii: Mapový podklad č. 8

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 629 kW.



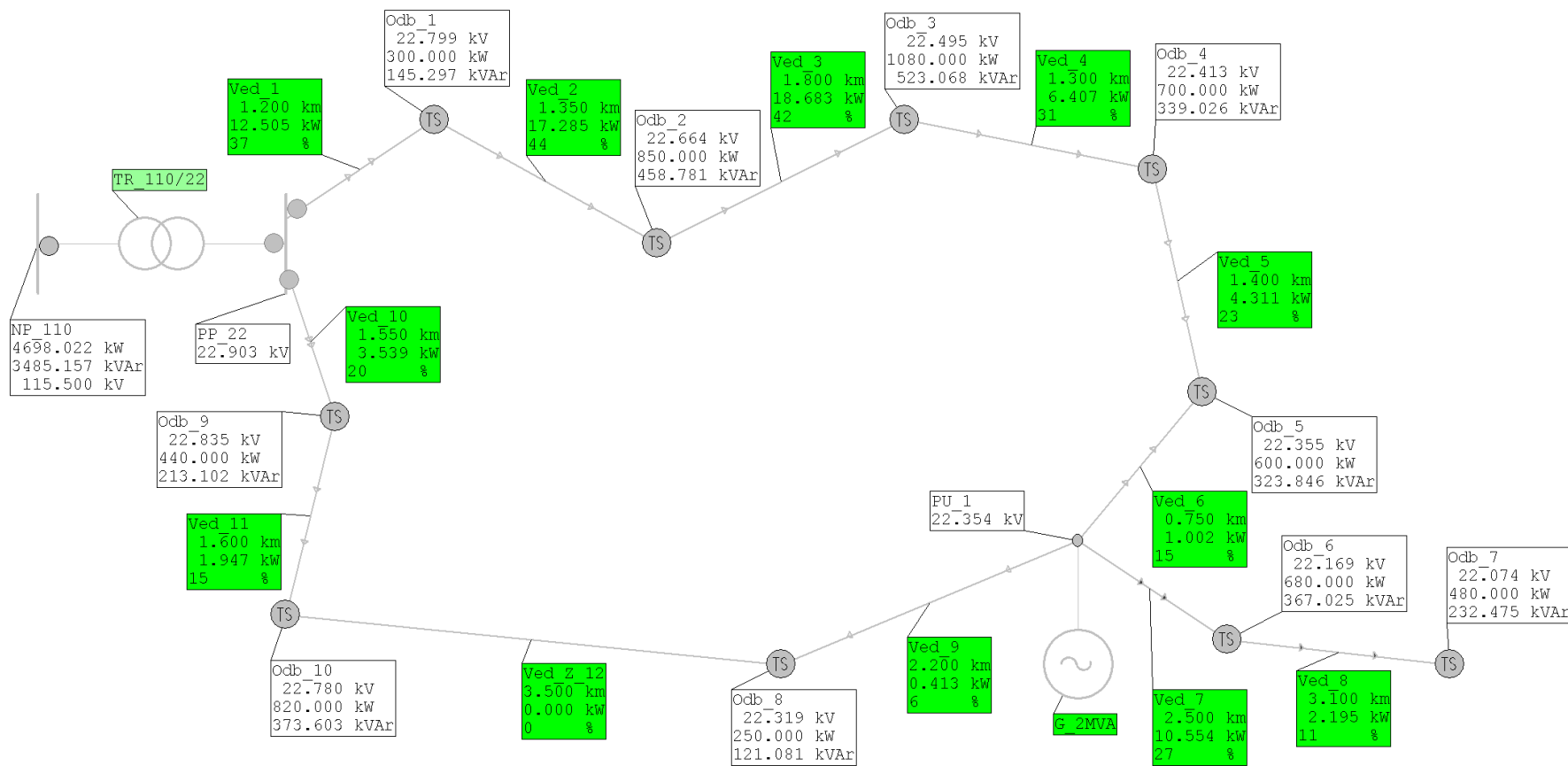
Obr. xiv: Schéma s výsledky pro zadání č. 8

Zadání č. 9



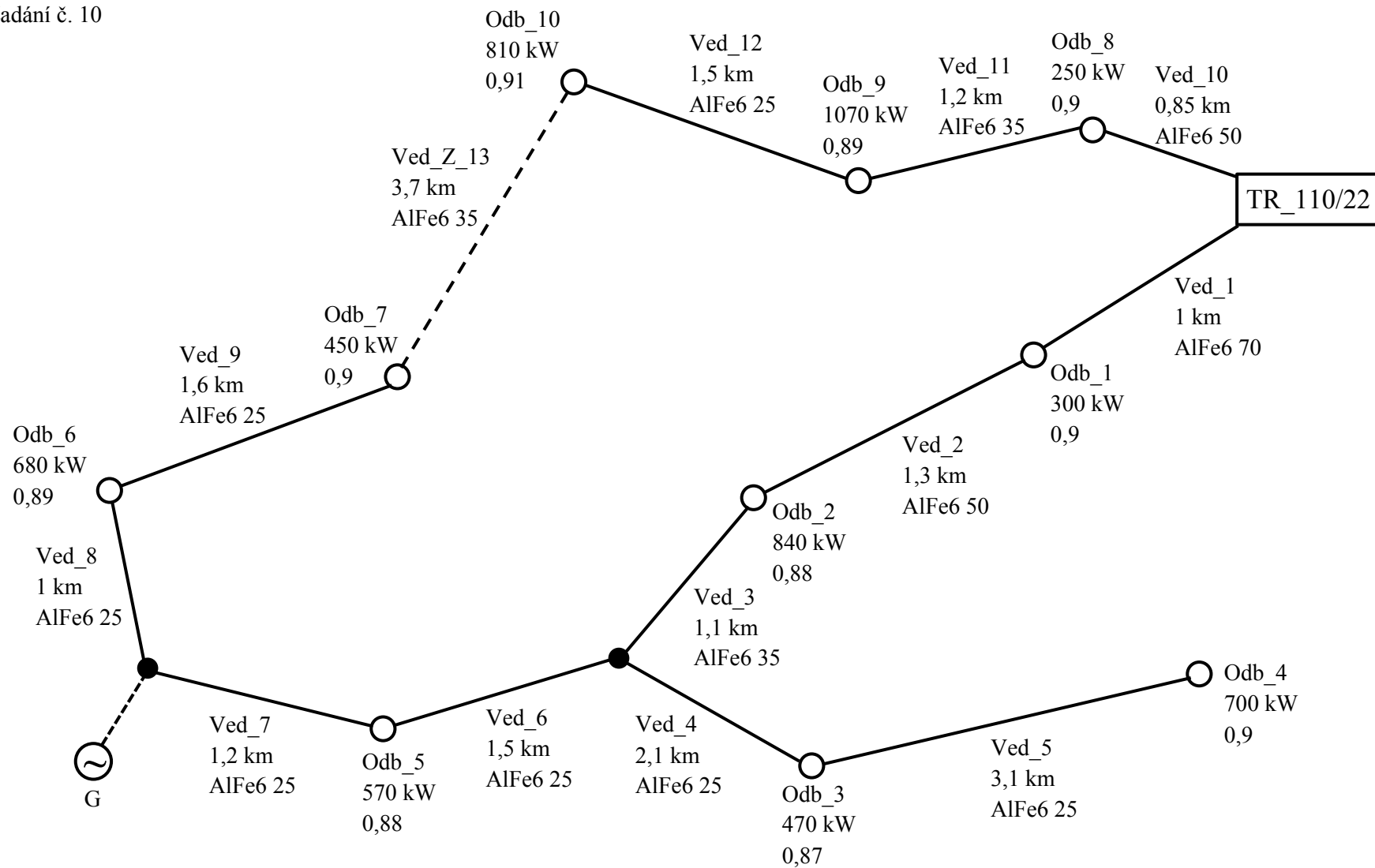
Obr. xv: Mapový podklad č. 9

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 601 kW.



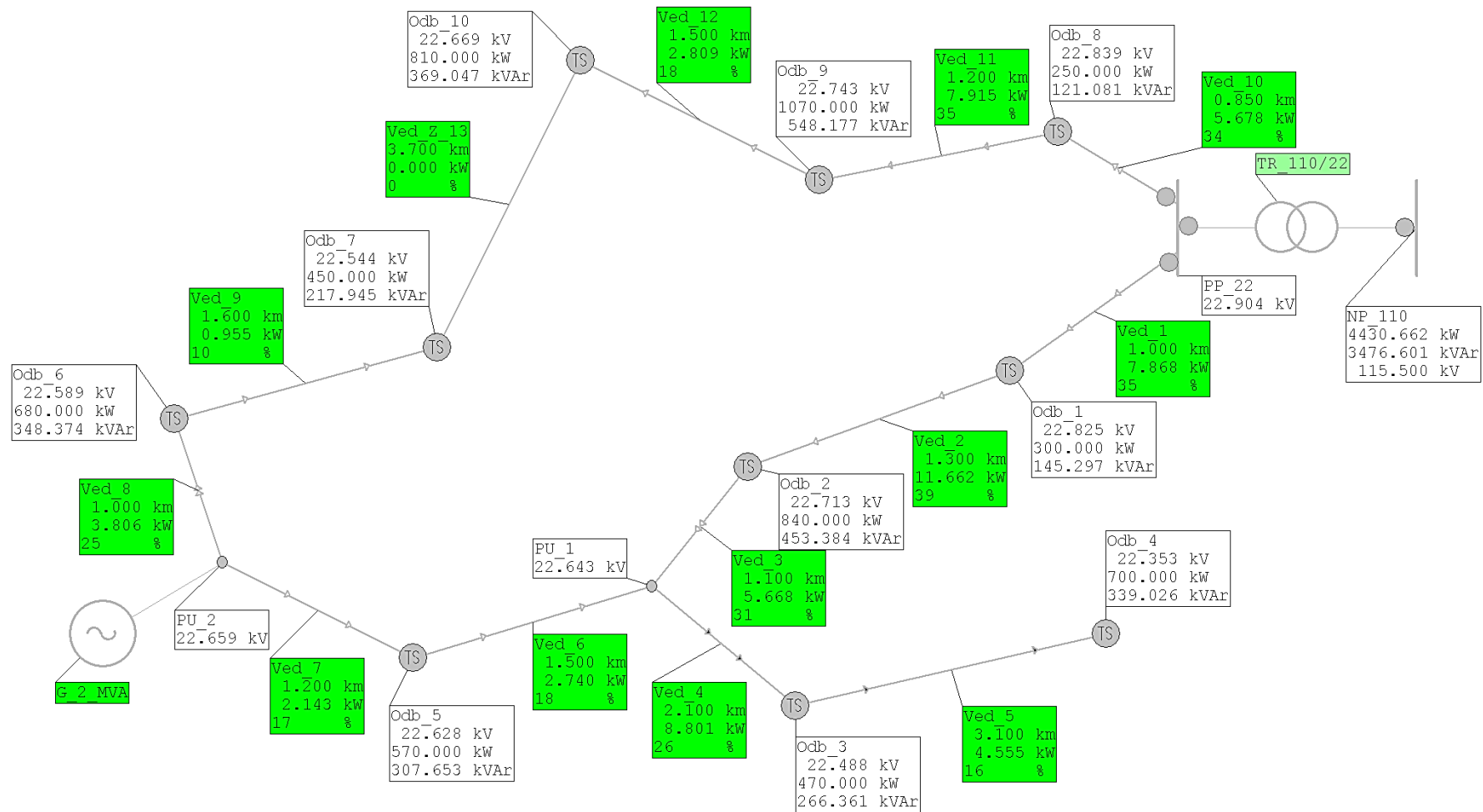
Obr. xvi: Schéma s výsledky pro zadání č. 9

Zadání č. 10



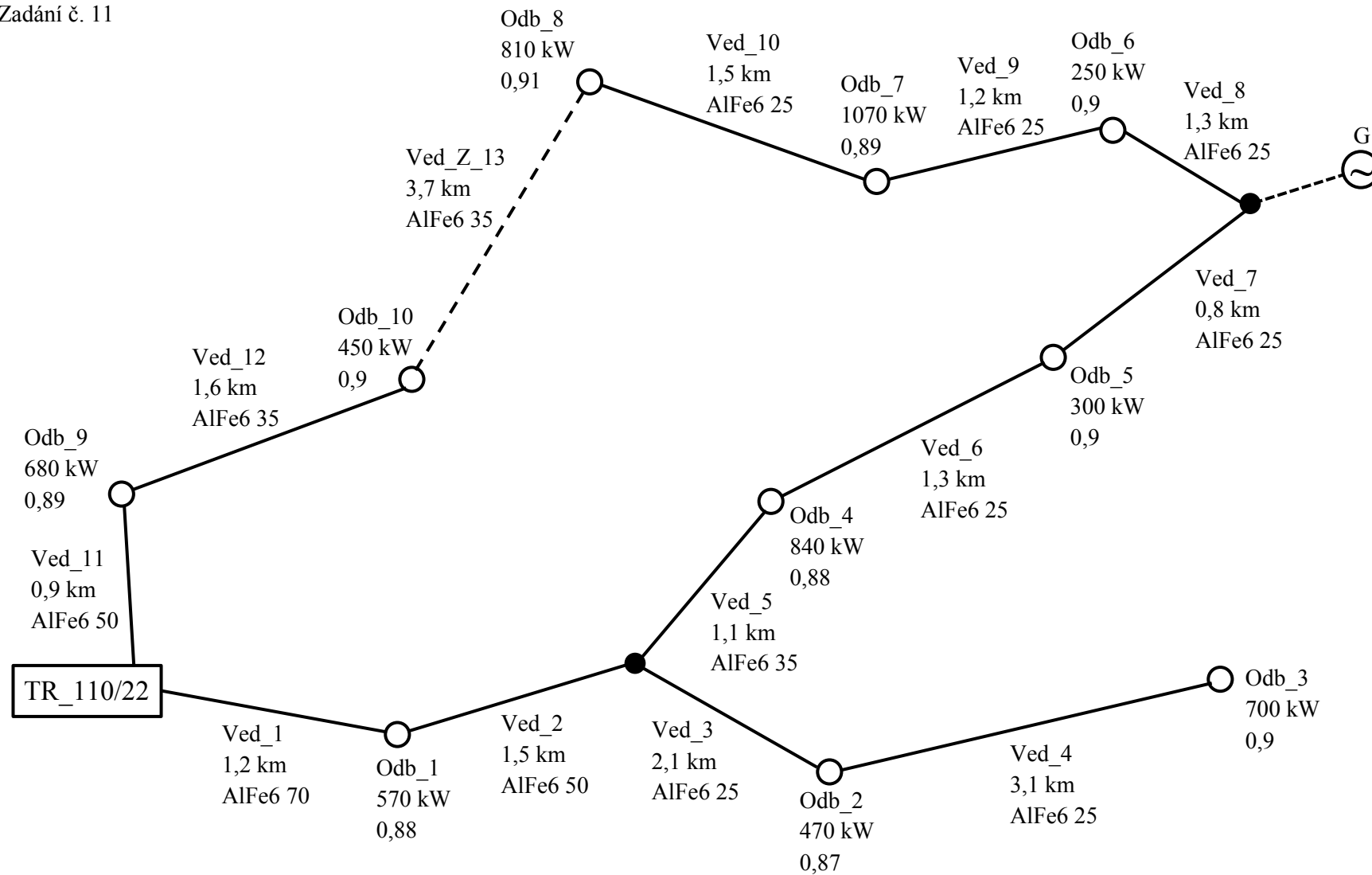
Obr. xvii: Mapový podklad č. 10

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 794 kW.



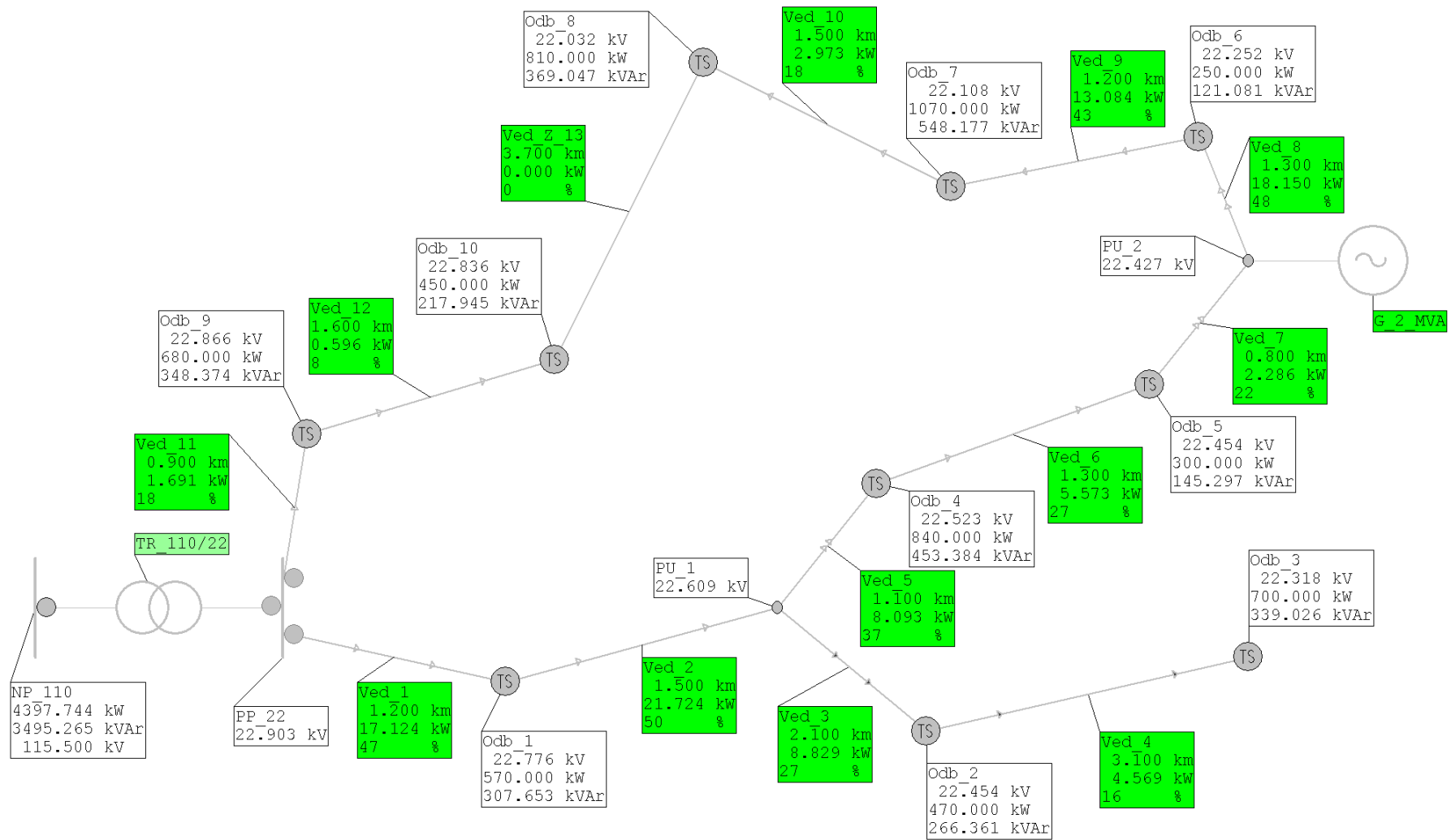
Obr. xviii: Schéma s výsledky pro zadání č. 10

Zadání č. 11



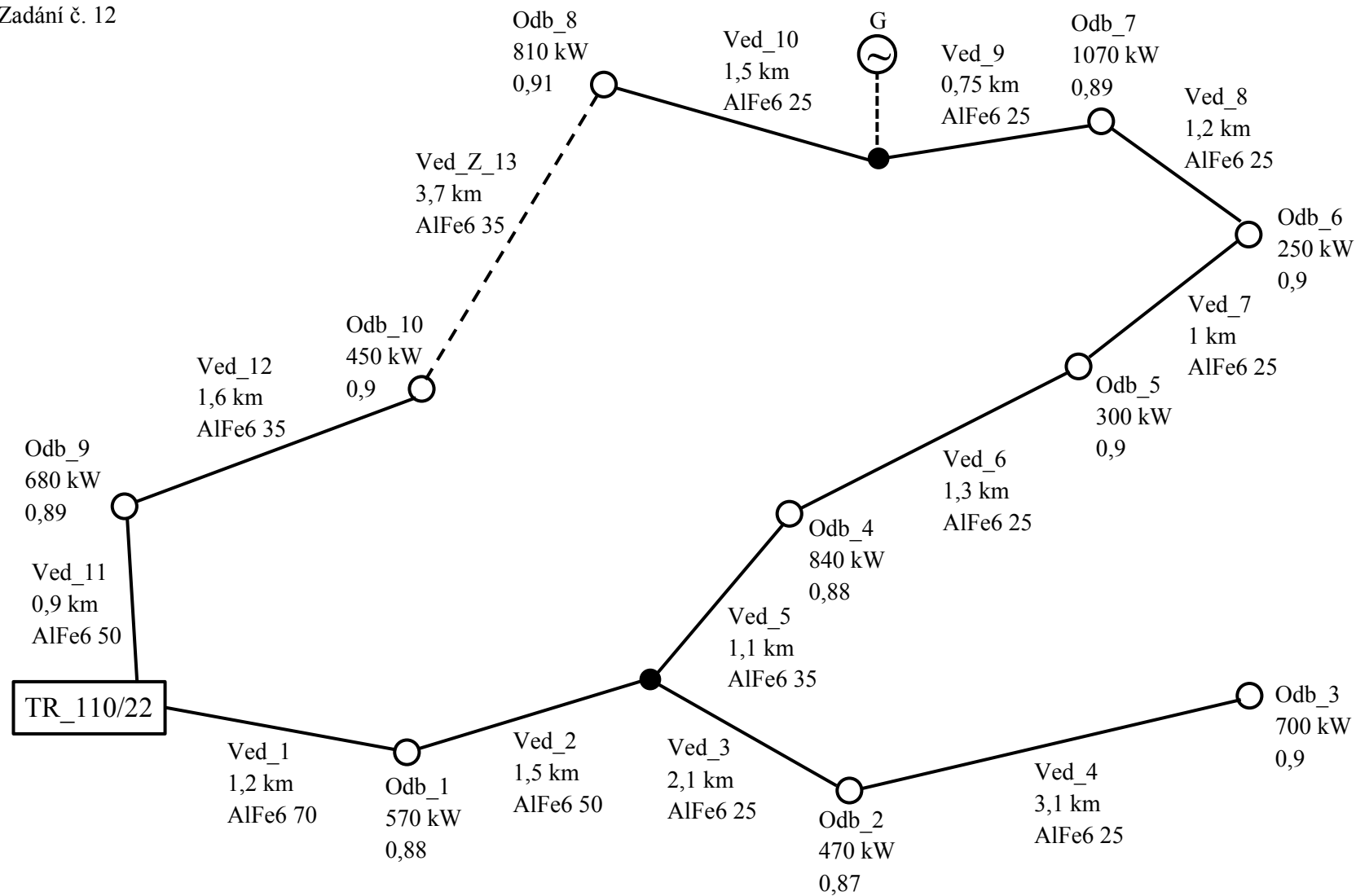
Obr. xix: Mapový podklad č. 11

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 867 kW.



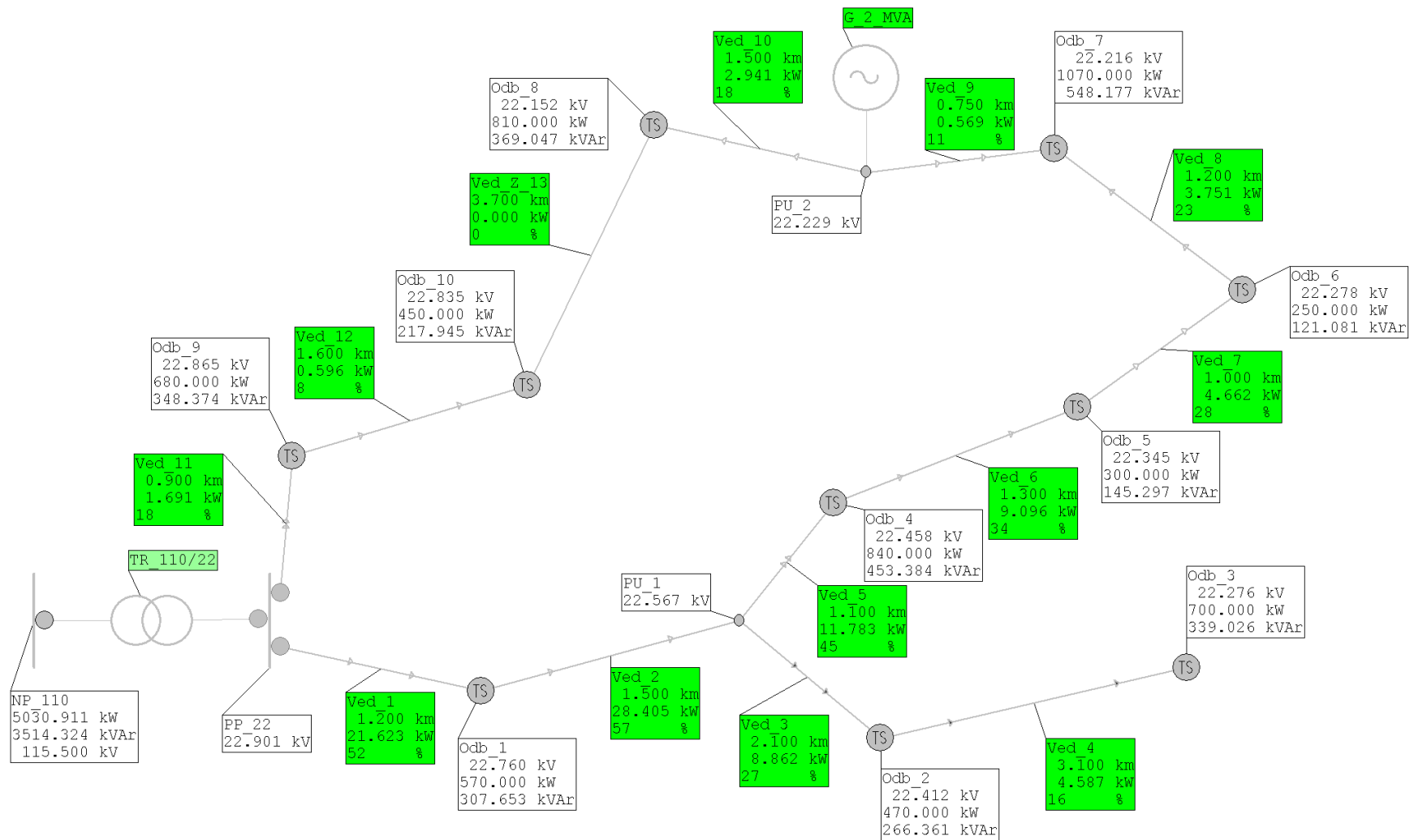
Obr. xx: Schéma s výsledky pro zadání č. 11

Zadání č. 12



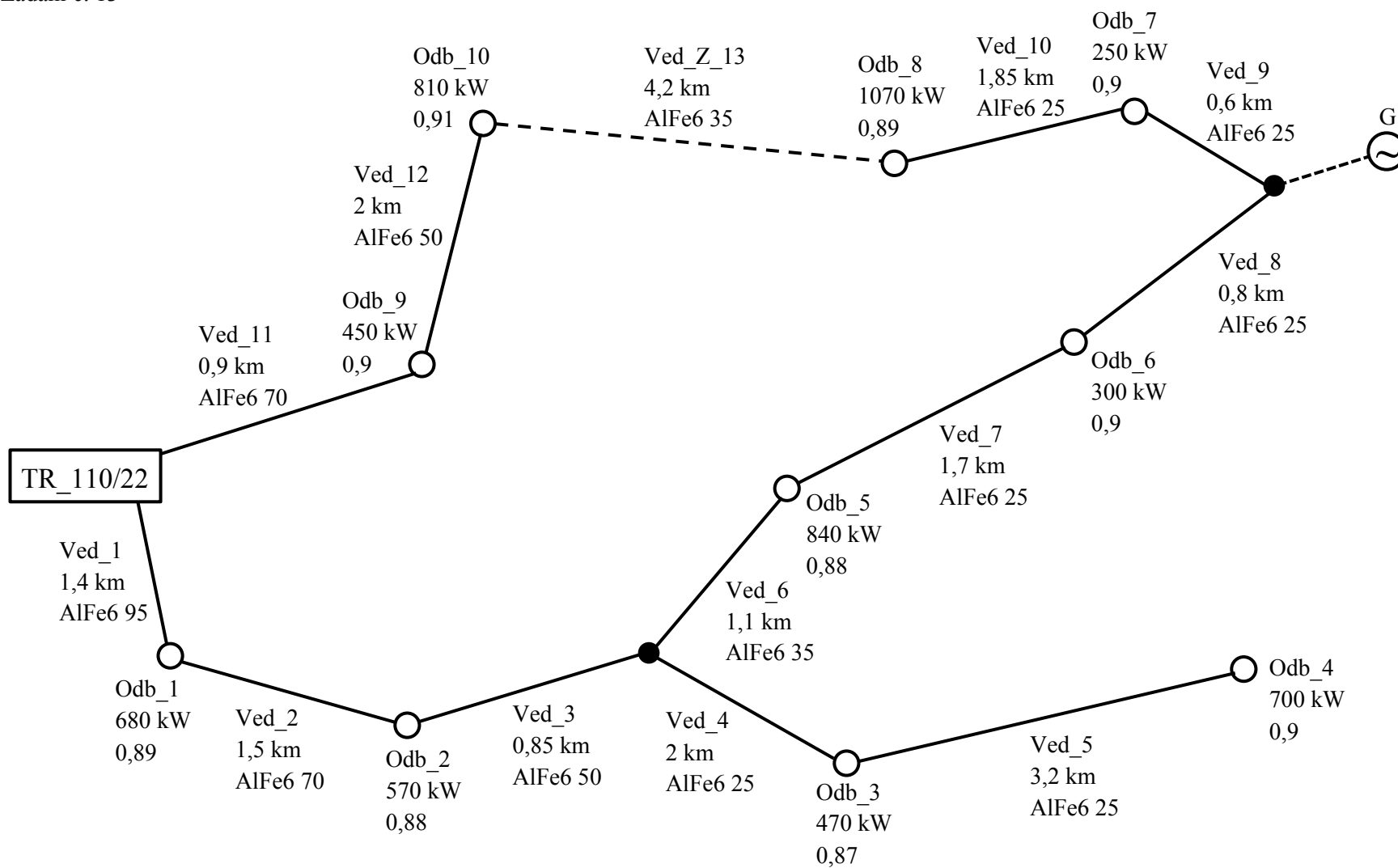
Obr. xxi: Mapový podklad č. 12

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 228 kW.



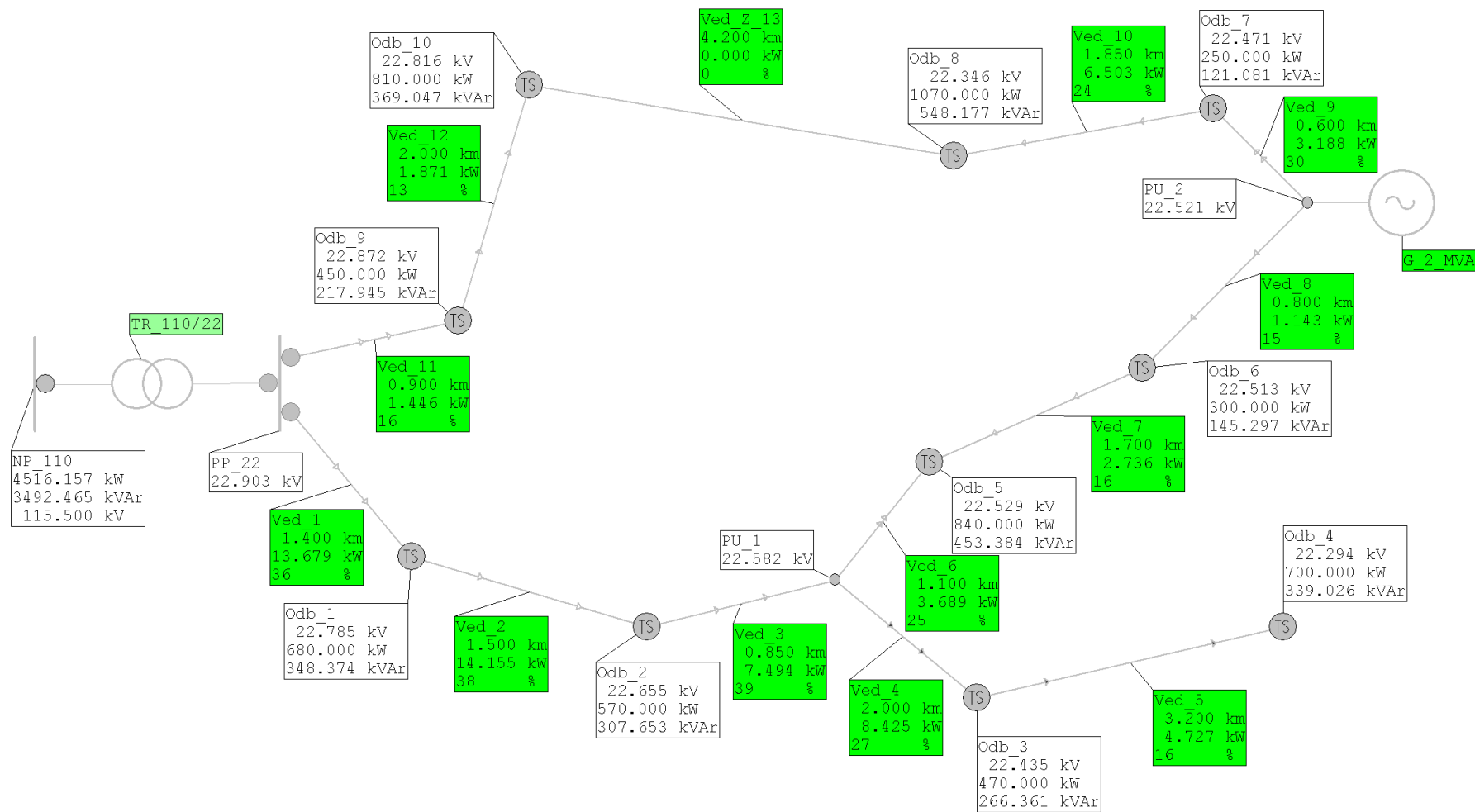
Obr. xxii: Schéma s výsledky pro zadání č. 12

Zadání č. 13



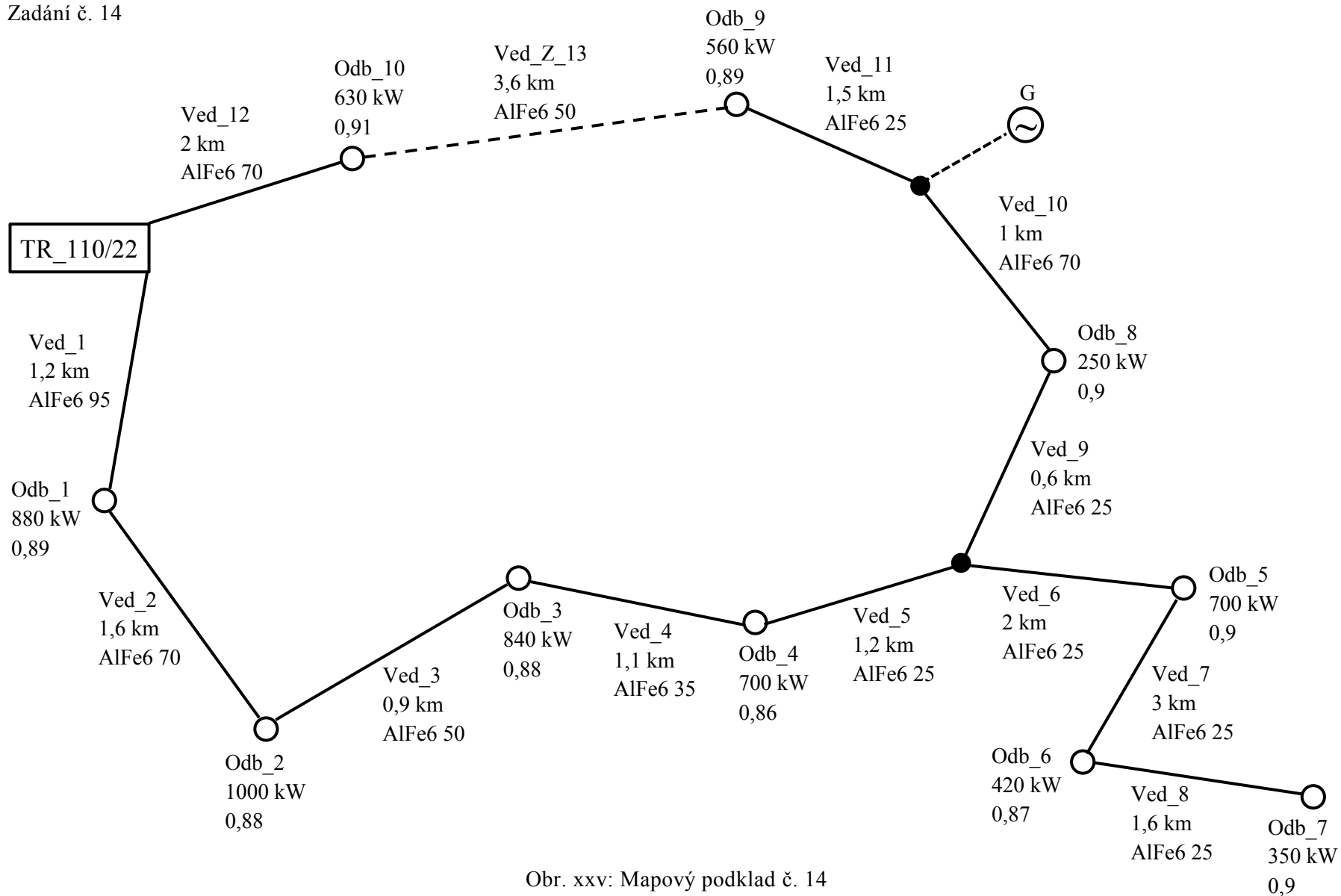
Obr. xxiii: Mapový podklad č. 13

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 713 kW.



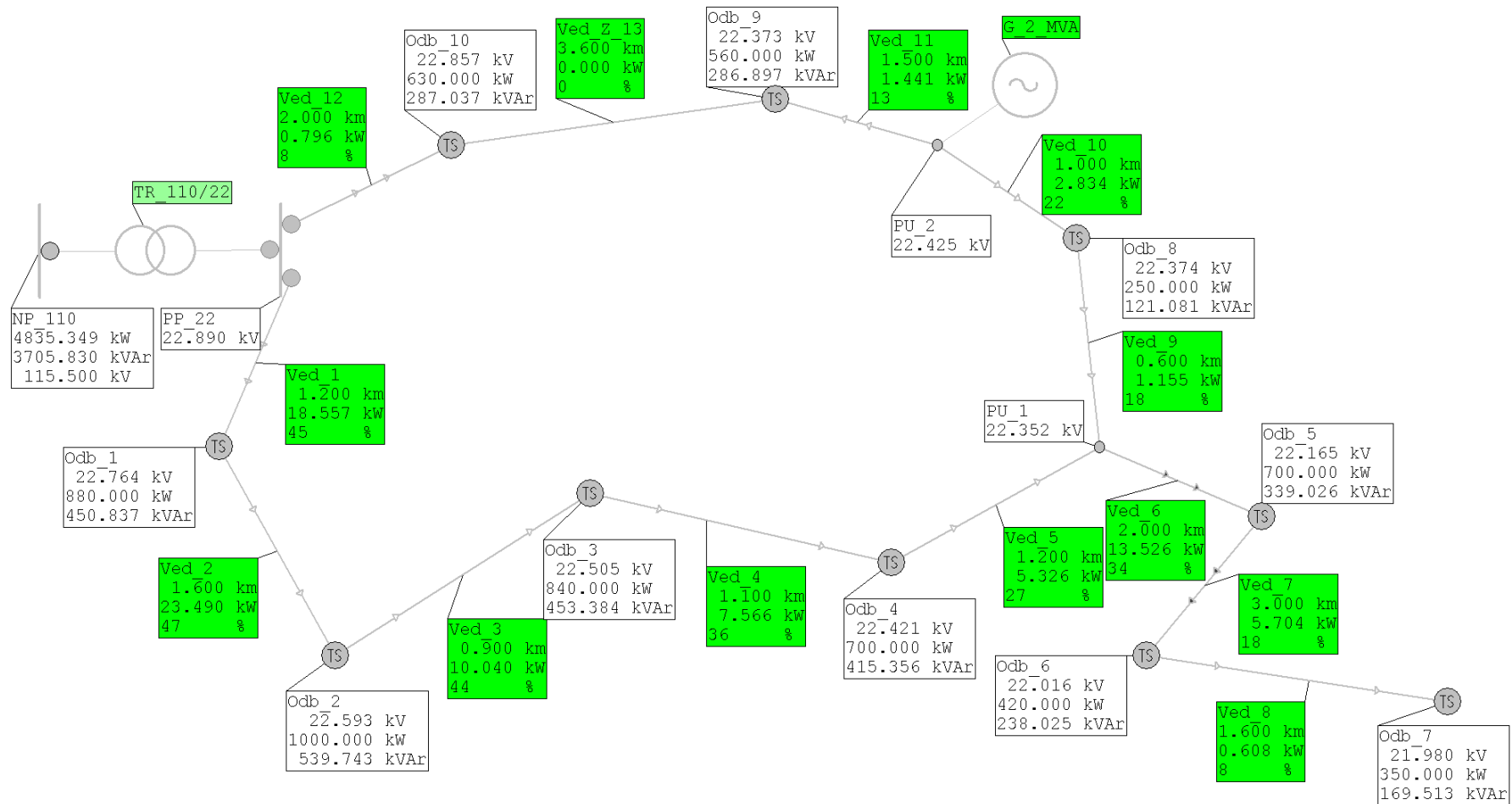
Obr. xxiv: Schéma s výsledky pro zadání č. 13

Zadání č. 14



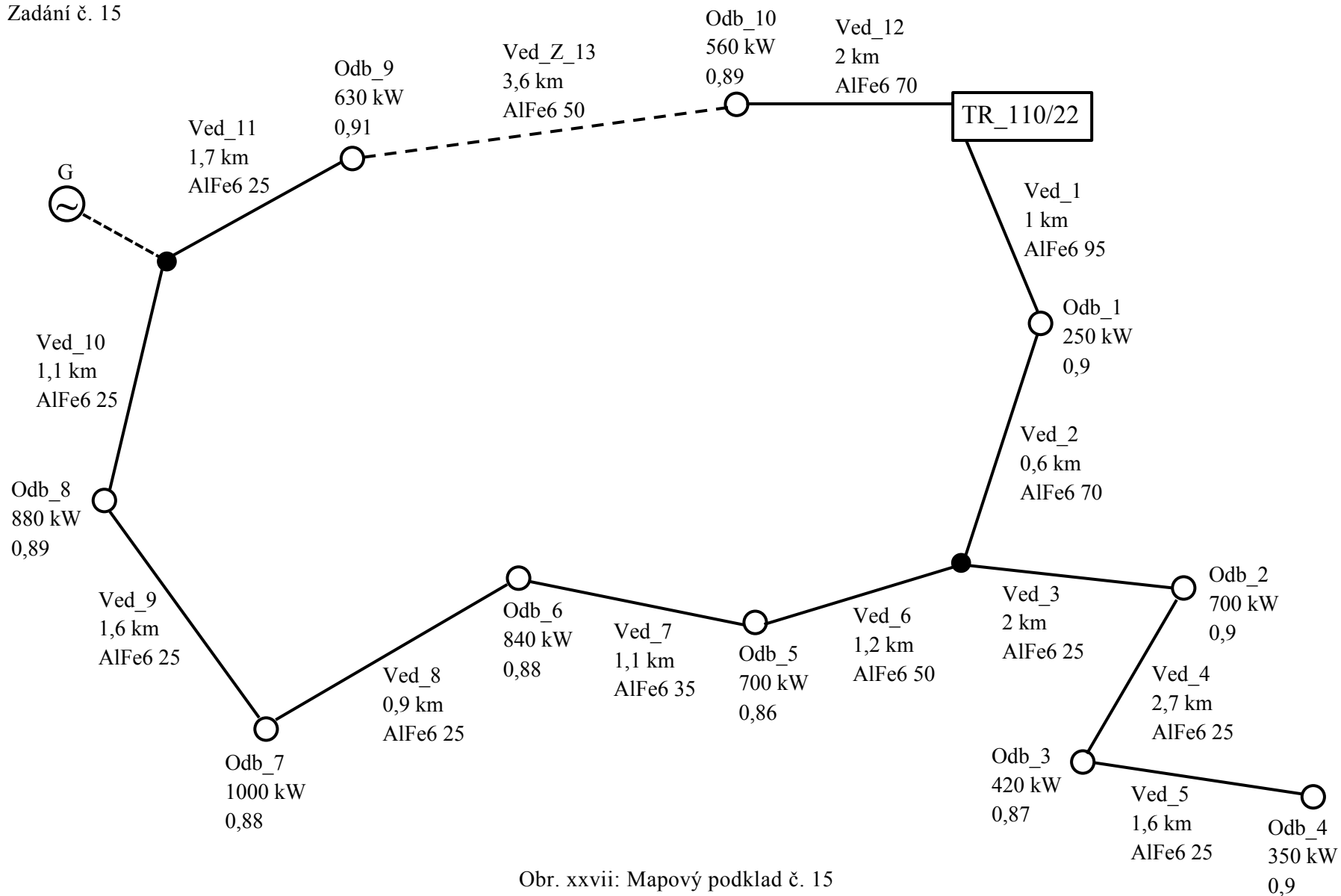
Obr. xxv: Mapový podklad č. 14

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 606 kW.



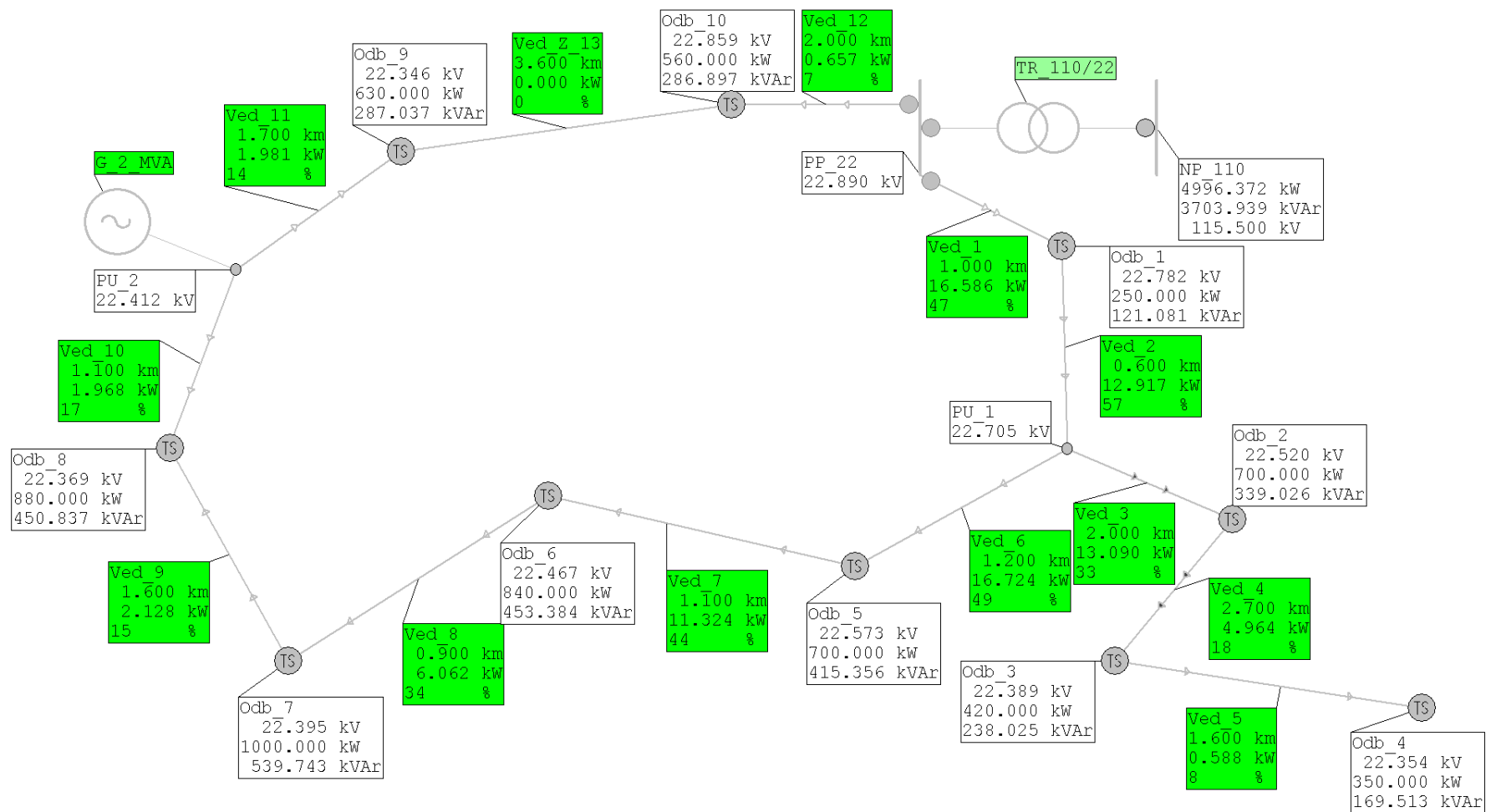
Obr. xxvi: Schéma s výsledky pro zadání č. 14

Zadání č. 15



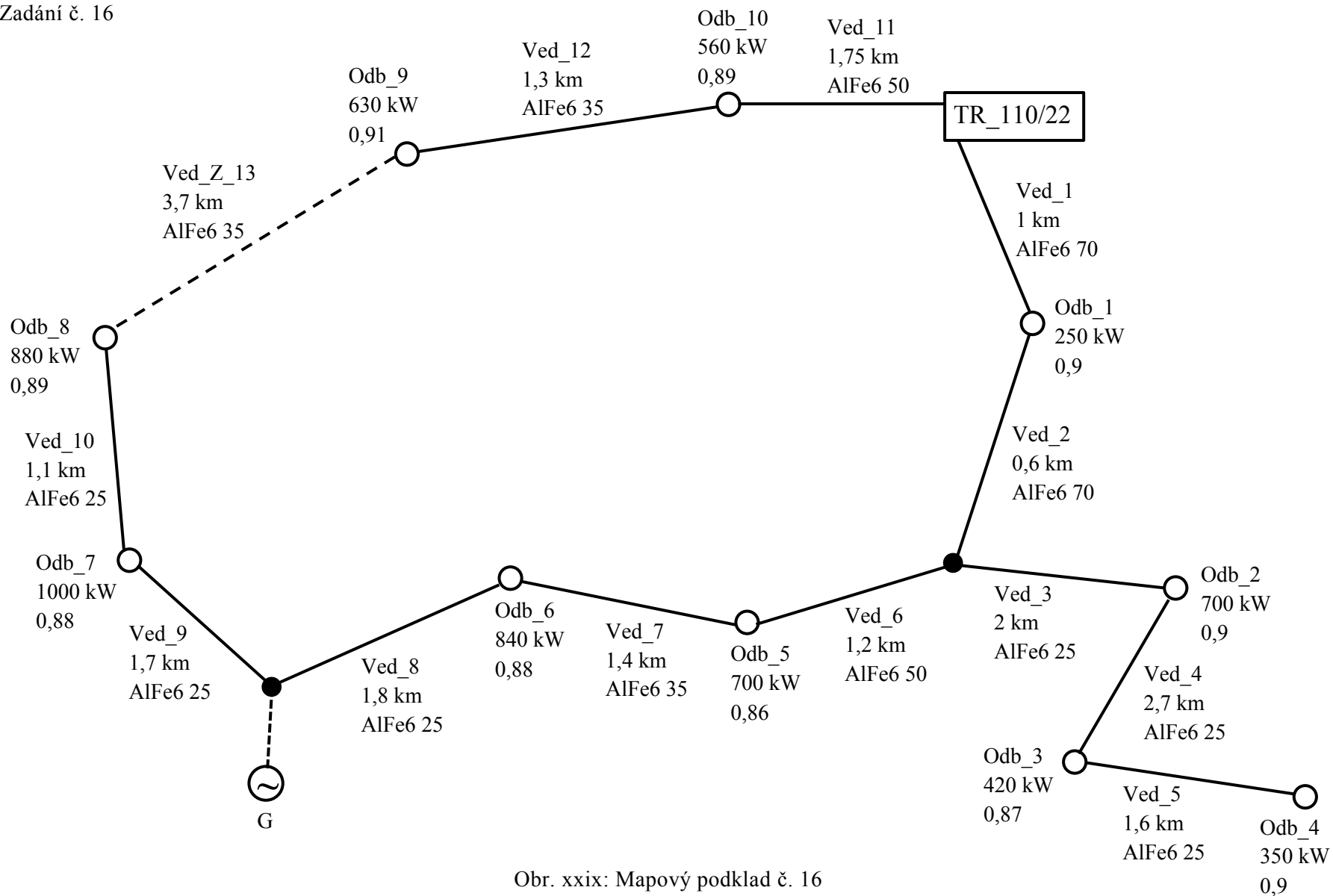
Obr. xxvii: Mapový podklad č. 15

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 443 kW.



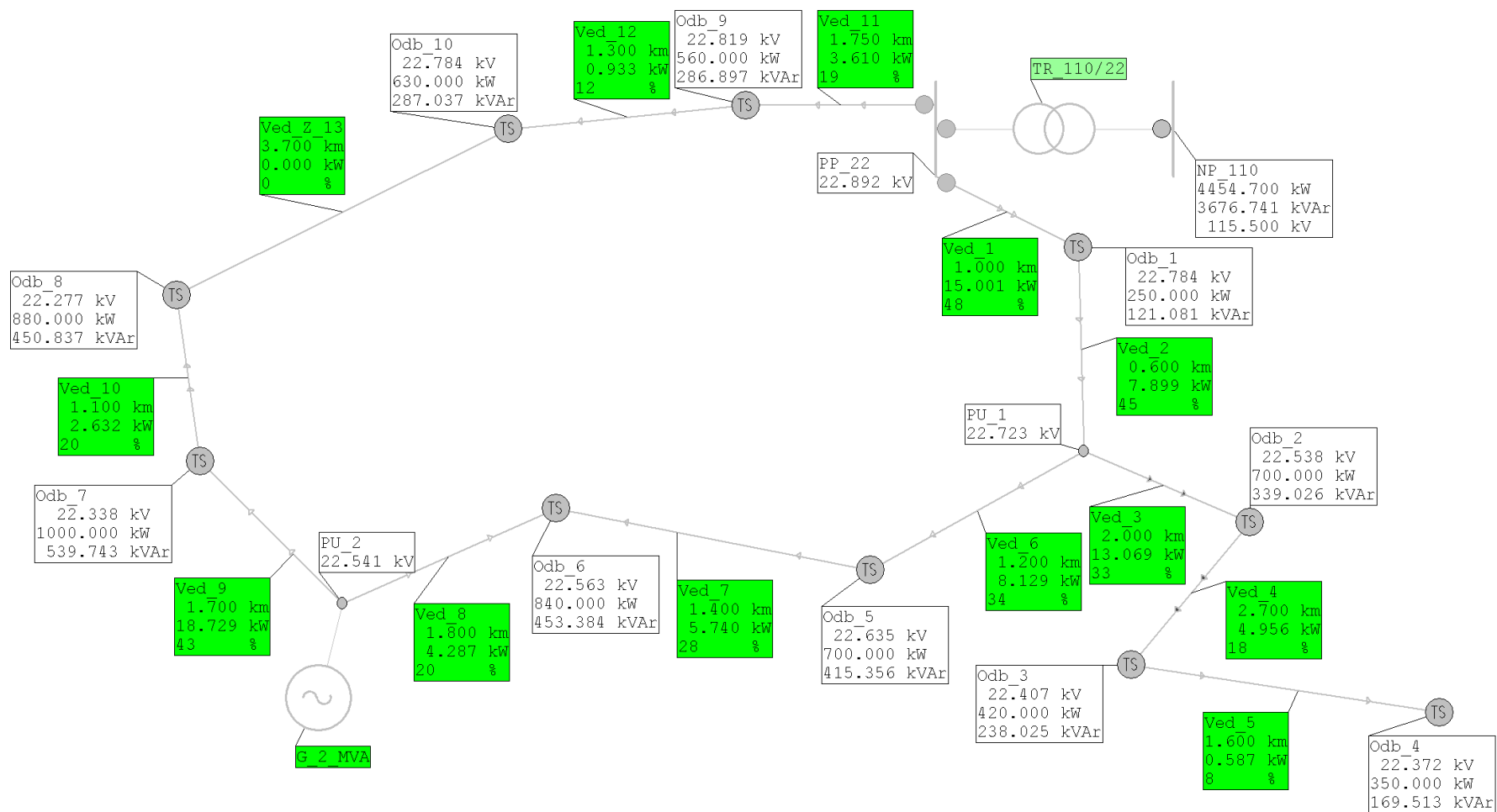
Obr. xxviii: Schéma s výsledky pro zadání č. 15

Zadání č. 16



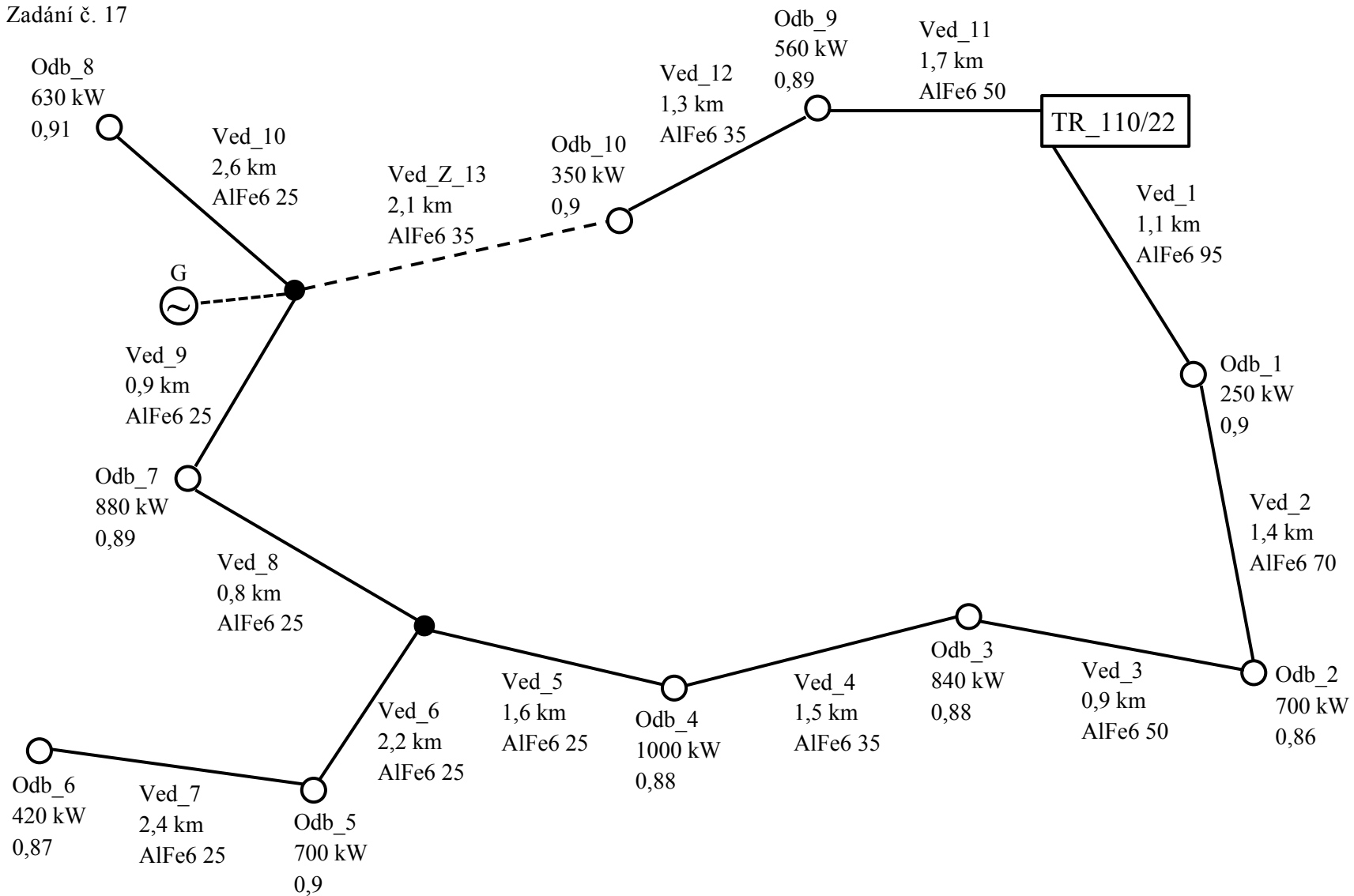
Obr. xxix: Mapový podklad č. 16

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 981 kW.



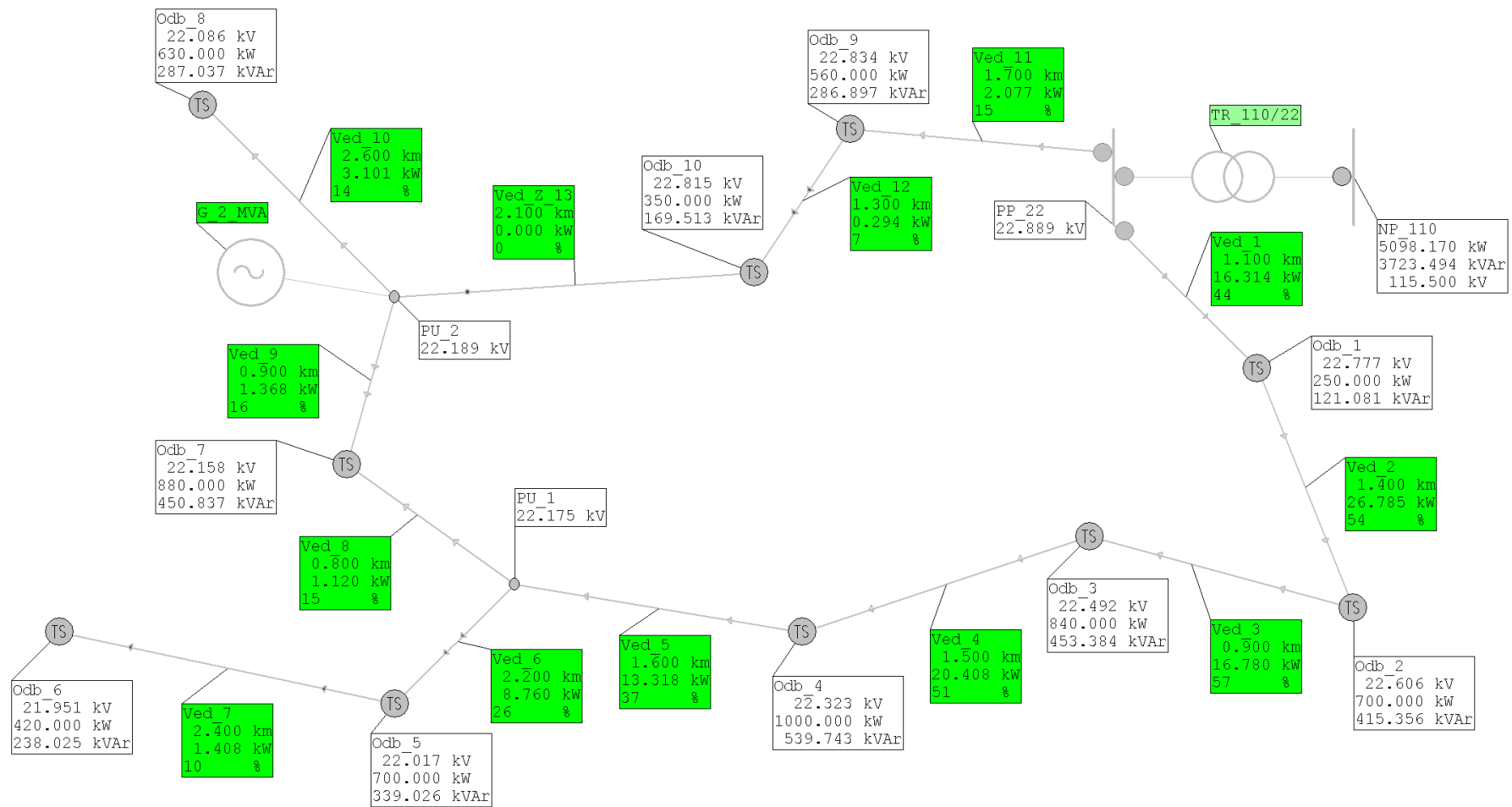
Obr. xxx: Schéma s výsledky pro zadání č. 16

Zadání č. 17



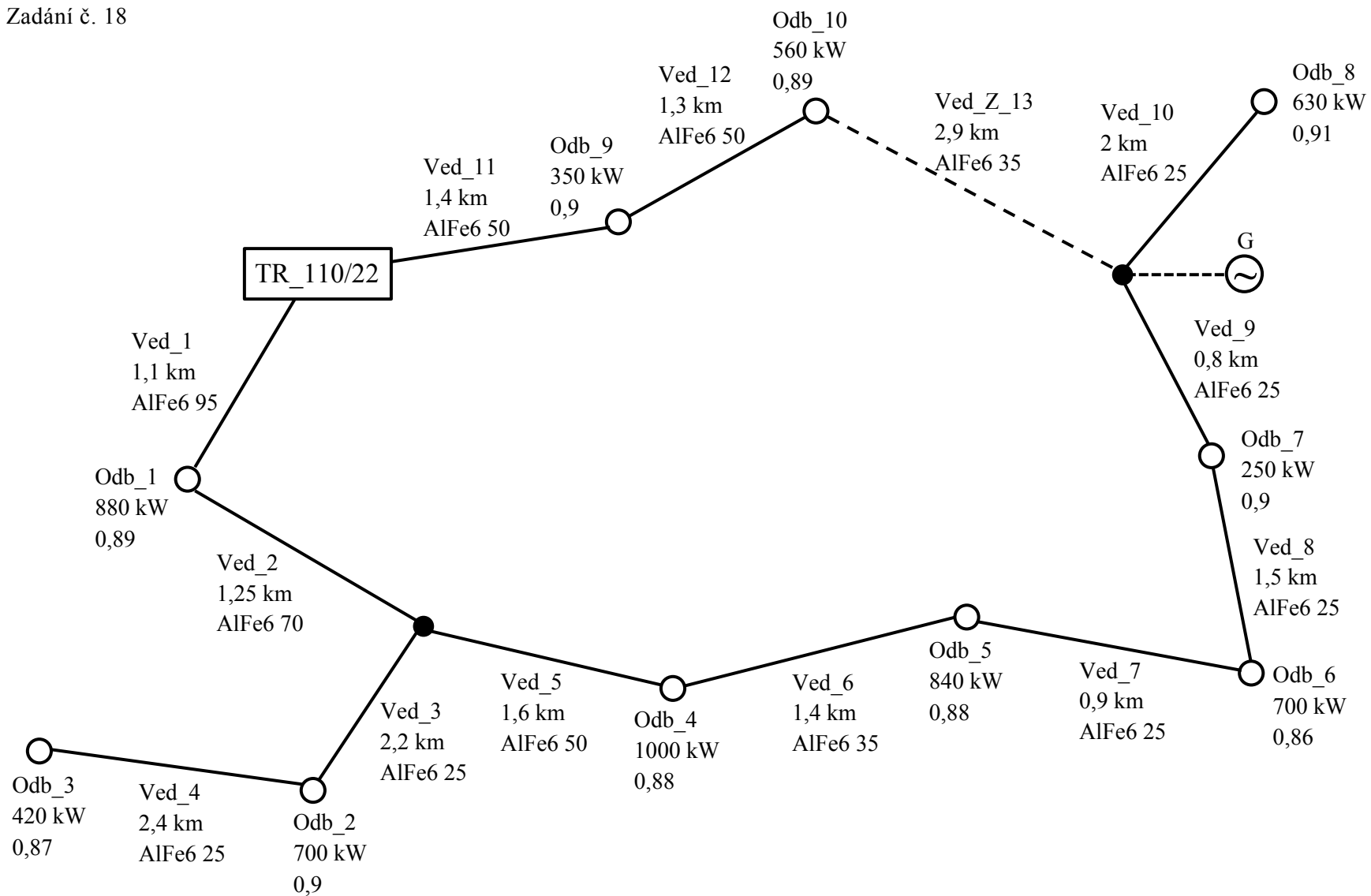
Obr. xxxi: Mapový podklad č. 17

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 364 kW.



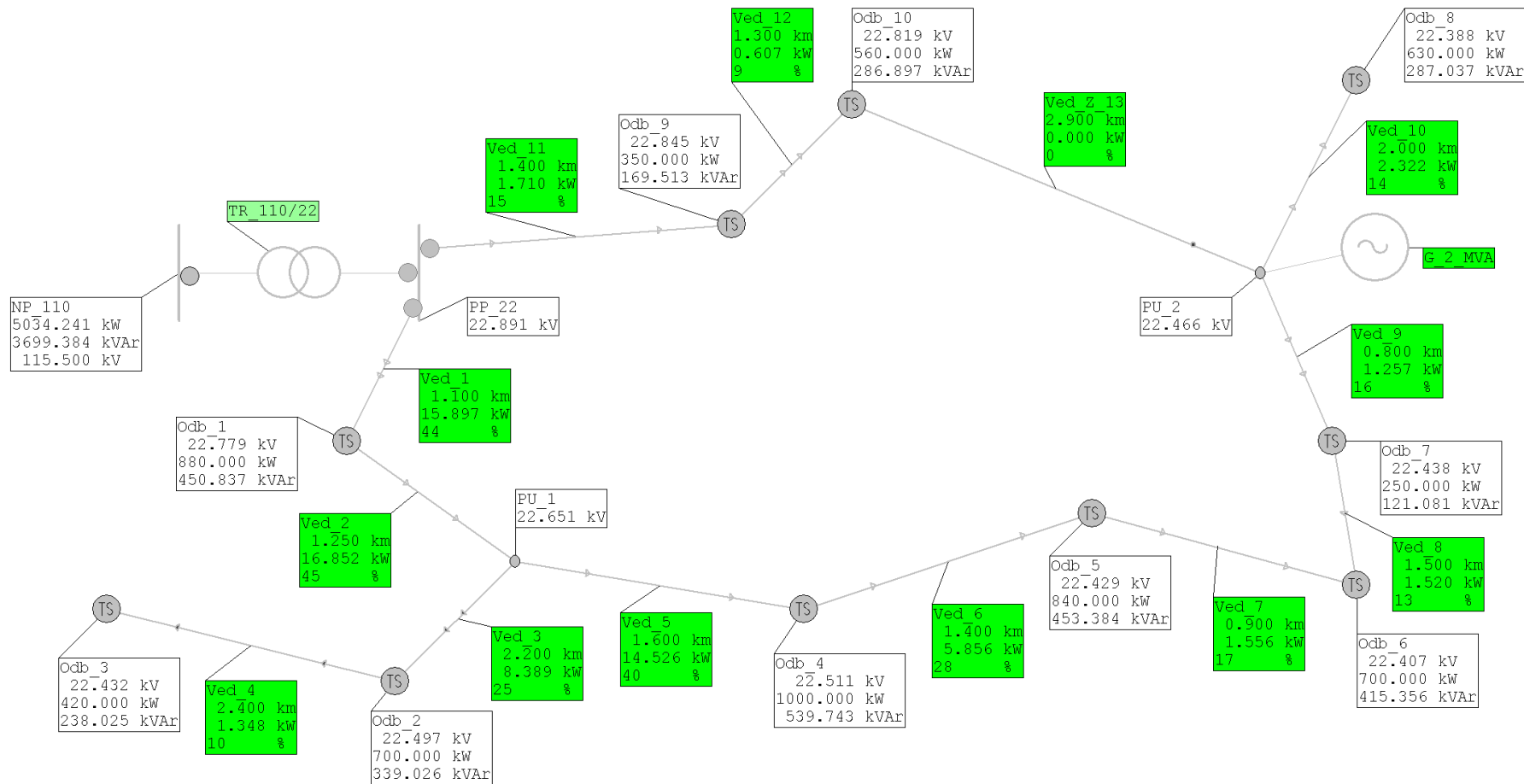
Obr. xxxii: Schéma s výsledky pro zadání č. 17

Zadání č. 18



Obr. xxxiii: Mapový podklad č. 18

Výsledné vypočtené hodnoty po namodelování v základní konfiguraci pro limitní výkon generátoru 1 388 kW.



Obr. xxxiv: Schéma s výsledky pro zadání č. 18

Výsledné hodnoty při zkratu v uzlu O3 (bod B)

Tab. i.i: Toky do zkratu v uzlu O3 (zkrat fáze R)

Od uzlu	\hat{I}_R (kA)	\hat{S} (MVA)	$3\hat{I}_0$ (kA)
O1	$3,767 \cdot e^{j148,375^\circ}$	143,538	$4,535 \cdot e^{j143,58^\circ}$
O4	$0,86 \cdot e^{j122,416^\circ}$	32,768	$0 \cdot e^{j194,036^\circ}$
Celkem	$4,556 \cdot e^{j143,636^\circ}$	173,593	$4,535 \cdot e^{j143,58^\circ}$

Tab. i.ii: Zkratová napětí včetně fázového natočení v místě poruchy postiženého uzlu O3:

	\hat{U}_1 (kV)	\hat{U}_2 (kV)	\hat{U}_0 (kV)	\hat{U}_R (kV)	\hat{U}_S (kV)	\hat{U}_T (kV)
O3	10,248 (358,337°)	4,179 (183,664°)	6,099 (174,69°)	0 (0°)	14,793 (231,865°)	16,129 (124,271°)

Bez připojeného generátoru

Tab. i.iii: Toky do zkratu v uzlu O3 (zkrat fáze R)

Od uzlu	\hat{I}_R (kA)	\hat{S} (MVA)	$3\hat{I}_0$ (kA)
O1	$3,789 \cdot e^{j148,204^\circ}$	144,386	$3,72 \cdot e^{j148,094^\circ}$
O4	$0,047 \cdot e^{j333,74^\circ}$	1,802	$0 \cdot e^{j180^\circ}$
Celkem	$3,742 \cdot e^{j148,134^\circ}$	142,592	$3,72 \cdot e^{j148,094^\circ}$

Tab. i.iv: Zkratová napětí včetně fázového natočení v místě poruchy postiženého uzlu O3

	\hat{U}_1 (kV)	\hat{U}_2 (kV)	\hat{U}_0 (kV)	\hat{U}_R (kV)	\hat{U}_S (kV)	\hat{U}_T (kV)
O3	9,619 (359,392°)	4,616 (179,596°)	5,004 (179,204°)	0 (0°)	14,404 (238,055°)	14,461 (120,723°)

Tab. i.v: Srovnání jednotlivých variant výpočtů zkratů a jejich hodnoty v daných fázích

Varianta	\hat{I}_R (kA)	\hat{I}_S (kA)	\hat{I}_T (kA)
1f (R-GND)	$4,556 \cdot e^{j143,636^\circ}$	-	-
2f (S-T)	-	$4,536 \cdot e^{j49,728^\circ}$	$4,536 \cdot e^{j229,728^\circ}$
3f (R-S-T)	$5,234 \cdot e^{j139,859^\circ}$	$5,234 \cdot e^{j259,859^\circ}$	$5,234 \cdot e^{j19,859^\circ}$
2fz (S-T-GND)	-	$5,168 \cdot e^{j27,125^\circ}$	$4,74 \cdot e^{j254,776^\circ}$

Výsledné hodnoty při zkratu na vedení V3 (bod C)

Tab. i.vi: Toky do zkratu na vedení V3 (zkrat fáze R)

Od uzlu	\hat{I}_R (kA)	\hat{S} (MVA)	$3\hat{I}_0$ (kA)
PP_22	$8,725 \cdot e^{j299,231^\circ}$	332,467	$8,431 \cdot e^{j303,045^\circ}$
O2	$2,412 \cdot e^{j320,198^\circ}$	91,894	$2,582 \cdot e^{j305,948^\circ}$
Celkem	$11,011 \cdot e^{j123,726^\circ}$	419,567	$11,011 \cdot e^{j123,726^\circ}$

Tab. i.vii: Zkratová napětí včetně fázového natočení v místě poruchy postiženého vedení V3

	\hat{U}_1 (kV)	\hat{U}_2 (kV)	\hat{U}_0 (kV)	\hat{U}_R (kV)	\hat{U}_S (kV)	\hat{U}_T (kV)
V3	9,839 (356,33°)	4,803 (186,523°)	5,182 (166,89°)	0 (0°)	13,291 (234,893°)	16,235 (117,507°)

Bez připojeného generátoru

Tab. i.viii: Toky do zkratu na vedení (zkrat fáze R)

Od uzlu	\hat{I}_R (kA)	\hat{S} (MVA)	$3\hat{I}_0$ (kA)
PP_22	$8,711 \cdot e^{j298,998^\circ}$	331,938	$8,318 \cdot e^{j302,243^\circ}$
O2	$2,252 \cdot e^{j318,278^\circ}$	85,83	$2,548 \cdot e^{j305,146^\circ}$
Celkem	$10,863 \cdot e^{j122,924^\circ}$	413,926	$10,863 \cdot e^{j122,923^\circ}$

Tab. i.ix: Zkratová napětí včetně fázového natočení v místě poruchy postiženého vedení V3

	\hat{U}_1 (kV)	\hat{U}_2 (kV)	\hat{U}_0 (kV)	\hat{U}_R (kV)	\hat{U}_S (kV)	\hat{U}_T (kV)
V3	9,798 (356,066°)	4,844 (186,602°)	5,113 (166,088°)	0 (0°)	13,165 (235,038°)	16,233 (116,899°)

Tab. i.x: Srovnání jednotlivých variant výpočtů zkratů a jejich hodnoty v daných fázích

Varianta	\hat{I}_R (kA)	\hat{I}_S (kA)	\hat{I}_T (kA)
1f (R-GND)	$11,011 \cdot e^{j123,726^\circ}$	-	-
2f (S-T)	-	$9,656 \cdot e^{j26,872^\circ}$	$9,656 \cdot e^{j206,872^\circ}$
3f (R-S-T)	$11,15 \cdot e^{j116,872^\circ}$	$11,15 \cdot e^{j236,872^\circ}$	$11,15 \cdot e^{j356,872^\circ}$
2fz (S-T-GND)	-	$12,087 \cdot e^{j1,302^\circ}$	$9,896 \cdot e^{j238,689^\circ}$